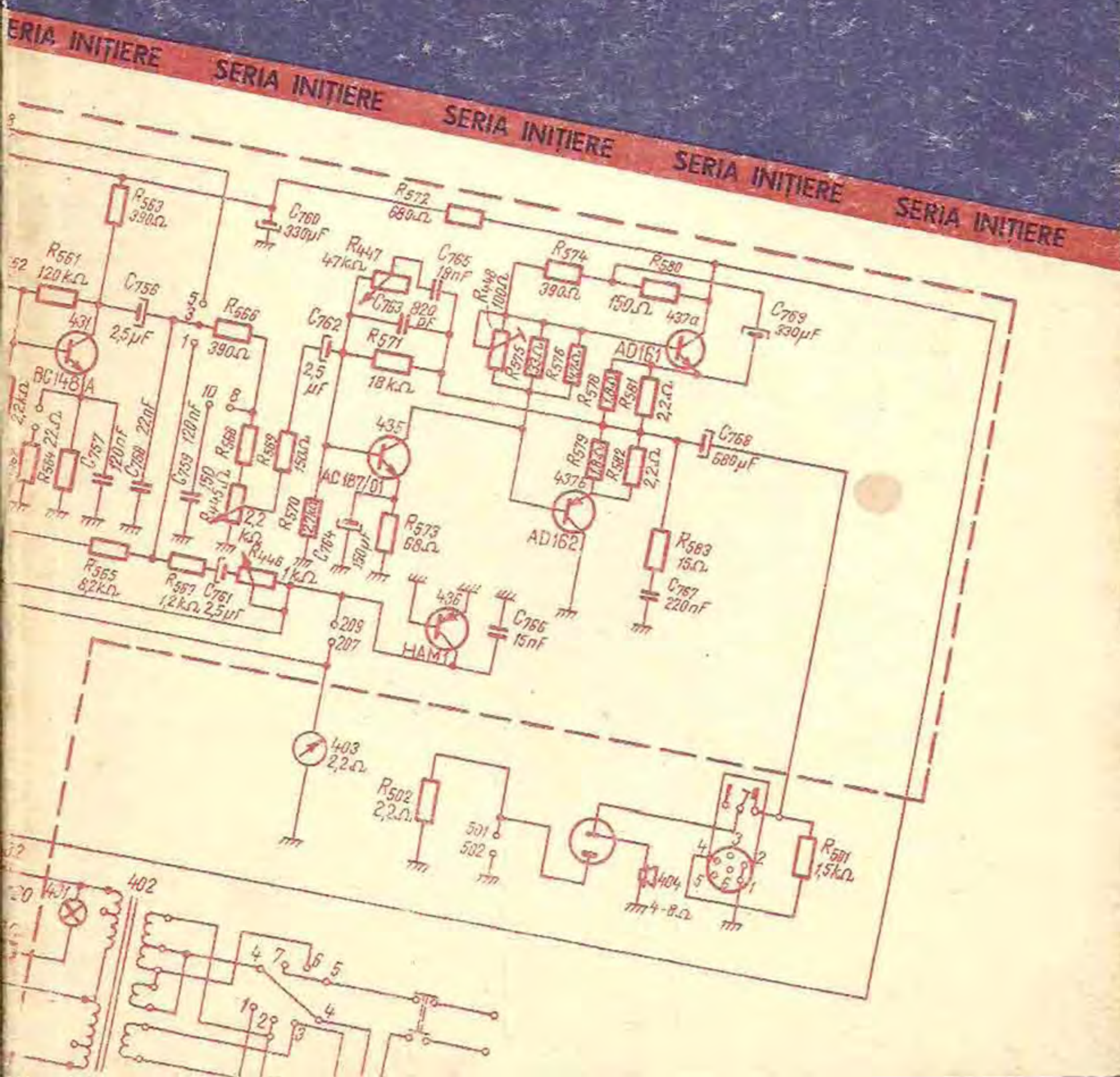
NICOLAE DRĂGULĂNESCU
CONSTANTIN MIROIU
DOINA MORARU

A...B...C...

Electronica în imagini

Componente pasive



BIBLIOTECA DE

Automatică—Informatică—Electronică—Management

SERIA INIŢIERE

E. VASILIU
INIŢIERE ÎN DISPOZITIVELE SEMICONDUCTOARE
D. STANOMIR
INIŢIERE ÎN ELECTROACUSTICA
W. TRUSZ
ABC-UL REPARĂRII RADIORECEPTOARELOR
Traducere din lb. polonă (Ciclul ABC-uri)
A. POPA
ABC DE PROTECŢIA MUNCII (ciclul ABC-uri)
MARGARETA DRAGHICI
INIŢIERE ÎN COBOL
STELIAN NICULESCU
INIŢIERE ÎN FORTRAN
PAUL CONSTANTINESCU ŞI ZAHARIA NICOLAE
INIŢIERE ÎN ORGANIZAREA ŞI PROIECTAREA SISTEMELOR DE CONDUCERE
I. V. DUMITRESCU ş.a.
INIŢIERE ÎN TELEPRELUCRAREA DATELOR
I. CREŢU
INIŢIERE ÎN ESTETICA PRODUSELOR (Ciclul ABC-uri)
E. AISBERG
ABC DE RADIO ŞI TELEVIZIUNE
Traducere din limba franceză
J. D. WARNIER, B. MI FLANAGAN
INSTRUIRE ÎN PROGRAMARE
Traducere din limba franceză
I. H. BERNHARD, B. KNUPPERTZ
INIŢIERE ÎN TIRISTOARE
Traducere din limba germană
W. DEPPEERT, K. STOLL
INIŢIERE ÎN PNEUMOAUTOMATICA
Traducere din limba germană
E. VASILIU
INIŢIERE ÎN RADIOELECTRONICA CUANTICĂ
V. POPESCU
INSTRUIREA PROGRAMATĂ ÎN CALCULATOARELE NUMERICE
ŞT. BIRLEA
INIŢIERE ÎN CIBERNETICA SISTEMELOR INDUSTRIALE
A. CARABULEA
INIŢIERE ÎN INGINERIA SISTEMELOR INDUSTRIALE
I. PAPADACHE
AUTOMATIZĂRI INDUSTRIALE, INIŢIERE, APLICAŢII
ŞT. NICULESCU
FORTRAN. INIŢIERE ÎN PROGRAMARE STRUCTURATĂ
J. FORRESTER
PRINCIPIILE SISTEMELOR: TEORIE ŞI AUTOINSTRUIRE PROGRAMATĂ
Traducere din lb. engleză S.U.A.
P. DRANSFIELD, D. F. HABER
INSTRUIRE PROGRAMATĂ ÎN METODA LOCULUI RĂDĂCINILOR
R. BĂRSAN
DISPOZITIVE ŞI CIRCUITE INTEGRATE CU TRANSFER DE SARCINĂ
D. RODDY
INIŢIERE ÎN MICROELECTRONICA
Traducere din lb. engleză
NICULESCU CI., IOSIF M.
INIŢIERE ÎN COMUNICAŢIILE PRIN FIBRE OPTICE
CSABAI DANIEL
TEHNICA SONORIZĂRII (traducere din lb. maghiară)
MITROFAN GH., PFLANZER G.
INIŢIERE ÎN TELEVIZIUNEA ÎN CULORI
RADU NEGOESCU
INIŢIERE ÎN ELECTRONICA BIOMEDICALA
RADU NEGOESCU
INSTRUMENTAŢIA ELECTRONICĂ BIOMEDICALA

ing. Nicolae Drăgulănescu dr. ing. Constantin Miroiu

ing. Doina Moraru

A, B, C...

ELECTRONICA ÎN IMAGINI

COMPONENTE PASIVE



Editura Tehnică

București — 1990

Contribuția autorilor la elaborarea lucrării:
ing. N. **Drăgulănescu** — cap. 3, 4 (parțial)
ing. C. **Miroiu** — cap. 1, 2, 3, 4 (parțial)
ing. D. **Moraru** — cap. 1, 2 (parțial), 5, 6

Redactor: ing. **Bogdan Zotta**
Tehnoredactor: **Dumitru Gheorghe**
Coperta: **Simona Dumitrescu**

Bun de tipar: 3.11.1989. Coli de tipar: 9.
C.Z. 621.38.

Tiparul executat sub com. 88/1989,
la Întreprinderea Poligrafică „Crișana",
Oradea, str. Leontin Sălăjan nr. 105.
România



ISBN 973-31-0103-6

INTRODUCERE

Imaginea constituie un important şi eficient mijloc de comunicare al cărui rol informativ-formativ devine cu atît mai pregnant cu cît conţinutul ei este mai reprezentativ, mai relevant şi mai inteligibil.

Seria de lucrări ELECTRONICA ÎN IMAGINI îşi propune să prezinte în mod sintetic şi actualizat — sub forma unor imagini sugestive, succint comentate — principalele aspecte implicate de structura, funcţionarea, realizarea şi utilizarea componentelor, circuitelor şi echipamentelor electronice.

Conţinutul lucrărilor se structurează astfel:

— componente pasive (rezistoare, condensatoare, bobine, cablaje imprimate)

— componente active semiconductoare (diode, tranzistoare, tiristoare, dispozitive optoelectronice)

— circuite electronice fundamentale

— circuite integrate

— echipamente de radio şi televiziune

— echipamente pentru înregistrarea/redarea sunetului şi/sau imaginii

— echipamente electronice pentru tehnica de calcul

— echipamente electronice pentru automatizări

Volumele din această serie se adresează tuturor electroniştilor profesionişti şi amatori — muncitori, tehnicieni, ingineri, cadre didactice, studenţi, elevi etc. — care doresc să-şi sistematizeze şi actualizeze cunoştinţele de specialitate. Ele pot fi utile şi celor care intenţionează să se iniţieze şi să se formeze în domeniile mai sus menţionate.

Mulţumim Editurii Tehnice pentru receptivitatea şi sprijinul acordat în publicarea acestei serii de lucrări.

AUTORII

CUPRINS

Capitolul 1

REZISTOARE

1.1. CLASIFICAREA REZISTOARELOR

Rezistoarele sînt componente pasive de bază în aparatura electronică, reprezentînd aproximativ 30—40% din numărul pieselor unui aparat electronic.

Aşa cum se vede în fig. 1.1, ele sînt de dimensiuni şi forme variate, fiind de tipuri diferite: rezistoare, potenţiometre, termistoare, varistoare.

Rezistoarele se pot clasifica după mai multe criterii (fig. 1.2).

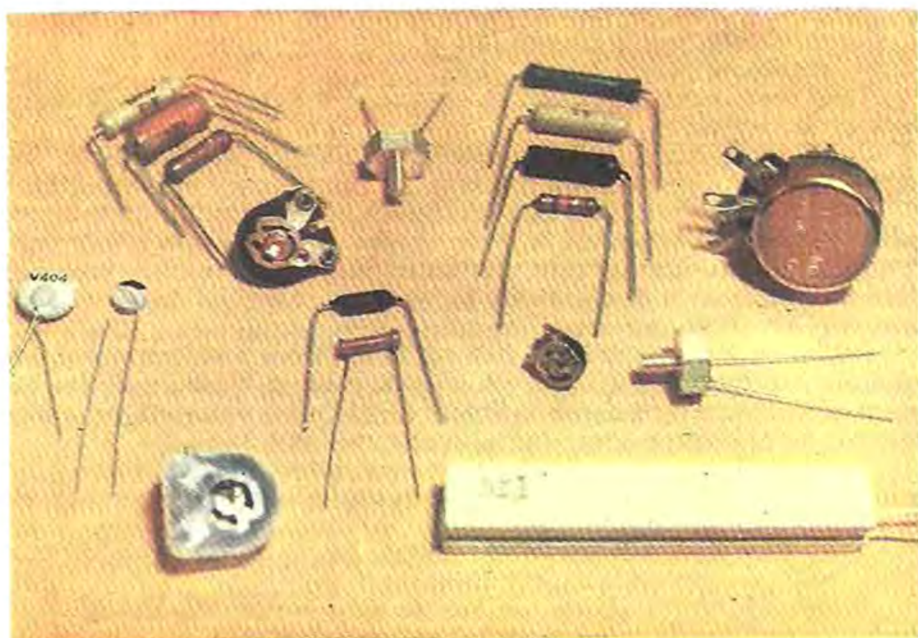


Fig. 1.1. Rezistoare de diferite tipuri.

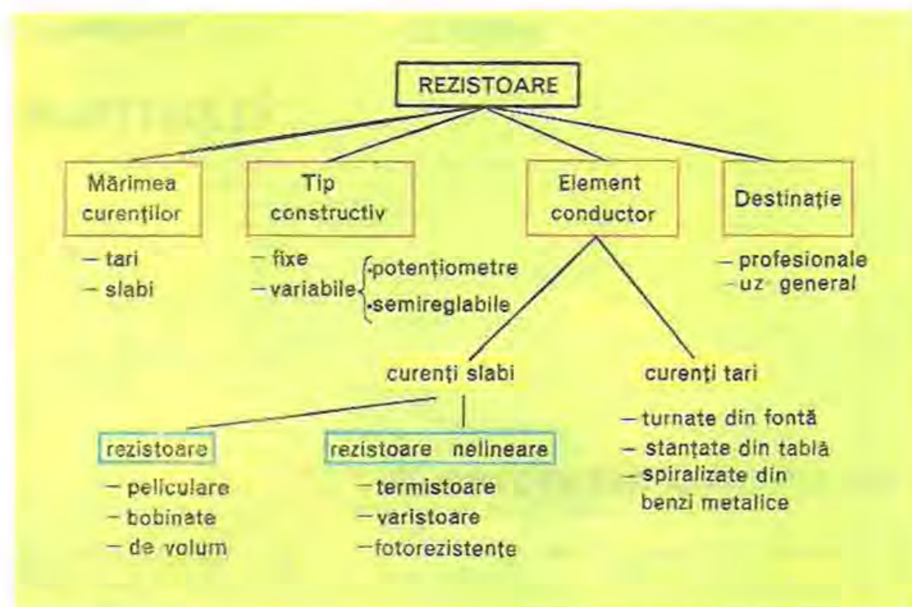


Fig. 1.2. Clasificarea rezistoarelor.

Astfel în funcţie de intensitatea curenţilor care le străbat, pot fi:

— rezistoare pentru curenţi tari şi

— rezistoare pentru curenţi slabi.

Tipul constructiv al rezistoarelor este un alt criteriu de clasificare conform căruia există:

— rezistoare fixe, a căror rezistenţă stabilită în procesul de fabricaţie rămîne constantă pe întreaga perioadă de funcţionare a rezistorului;

— rezistoare variabile a căror rezistenţă poate fi modificată în anumite limite, în timpul funcţionării, în vederea efectuării unor operaţii de reglaj.

Elementul conductor care realizează funcţia de rezistor propriu-zis oferă încă un criteriu de clasificare în funcţie de domeniul de curent pentru care este construit rezistorul.

Astfel, pentru curenţi slabi (folosiţi în electronica industrială şi de uz general) rezistoarele pot fi de volum, peliculare şi bobinate. O categorie aparte o constituie rezistoarele neliniare care folosesc proprietăţile semiconductoare în realizarea unor anumite caracteristici tehnice.

Rezistoarele destinate regimului de curenţi tari sînt rezistoare folosite în industria energetică şi electrotehnică, de valori mici şi cu elementul rezistiv obţinut prin:

— turnare din fontă (grile din fontă)

— ştanţare din tablă (tablă silicioasă)

— spiralizate (cu număr variabil de spire — după necesităţi —, din conductor metalic, din aliaj special, benzi metalice etc.).

După destinaţie, rezistoarele pot fi:

— profesionale

— de uz general.

1.2. PARAMETRII REZISTOARELOR

Rezistoarele fixe sînt caracterizate printr-o serie de parametri electrici şi neelectrici (mecanici, climatici), principalii parametri electrici fiind:

— rezistenţa nominală R_n şi toleranţa t (exprimată în procente).

Rezistenţa nominală R_n este valoarea rezistenţei care trebuie realizată prin procesul tehnologic şi care se înscrie pe corpul rezistorului. A obţine toate valorile de rezistenţe necesare în montajele electronice ar însemna o mărire inutilă a complexităţii procesului tehnologic, pentru că, în practică, valorile rezistoarelor pot avea abateri de la valorile nominale, fără a modifica parametrii circuitului unde sînt folosite. Din această cauză s-au ales discontinuu valorile nominale ale rezistenţei rezistoarelor ce urmează a se fabrica, alcătuindu-se serii de valori în funcţie de clasele de toleranţă (conform recomandărilor Comitetului Electrotehnic Internaţional). Unitatea de măsură este: $[R]=1\ \Omega$ (ohm), cu multiplii săi: $10^3\ \Omega=1\ \text{k}\Omega$, $10^6\ \Omega=1\ \text{M}\Omega$, $10^9\ \Omega=1\ \text{G}\Omega$.

Toleranţa, t, exprimă în procente abaterea maximă admisibilă a valorii reale R a rezistenţei, faţă de valoarea nominală R_n:

$$t=\pm\max\frac{|R-R_n|}{R_n}\times 100$$

Seriile valorilor nominale ale rezistenţei rezistoarelor alcătuiesc progresii geometrice în domeniul $1\div10\Omega$, $10\div100\Omega$ ş.a.m.d., iar clasele de toleranţă corespund seriei de valori conform tabelului 1.1.

Tabelul 1.1

Seriile de valori nominale şi clasele de toleranţă ale rezistoarelor

Seria	E_6	E_{12}	E_{24}	E_{48}	E_{96}	E_{192}
Toleranţa	±20%	±10%	±5%	±2,5%	±1,25%	±0,6%

Valorile nominale ale rezistoarelor din seriile uzuale E_6, E_{12} şi E_{24} sînt date în fig. 1.3.

— Puterea de disipaţie nominală, P_n, (exprimată în Waţi) şi tensiunea nominală, U_n, reprezintă puterea electrică maximă şi respectiv tensiunea electrică maximă ce se pot aplica rezistorului în regim de funcţionare îndelungată fără a-i modifica caracteristicile.

Uzual, pentru a-i asigura rezistorului o funcţionare cît mai îndelungată, puterea disipată de rezistor în circuit este bine să fie mai mică decît 0,5 P_n. Puterile uzuale standardizate ale rezistoarelor sînt:

0,05; 0,10; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 6; 12; 16; 25; 40; 50; 100 W.

Pentru o tensiune nominală U_n dată şi o putere disipată maximă P_n impusă, există în seriile de valori nominalizate o singură valoare numită

$R_n \cdot 10^K$	E6 ± 20 %	E12 ± 10 %	E24 ± 5 %	E6 ± 20 %	E12 ± 10 %	E24 ± 5 %	E6 ± 20 %	E12 ± 10 %	E24 ± 5 %	E6 ± 20 %	E12 ± 10 %	E24 ± 5 %
$0 \leq K \leq 9$	100	100	100		180	180	330	330	330		560	560
(Ω)			110			200			360		620	
		120	120	220	220	220		390	390	680	680	680
			130			240			430			750
	150	150	150		270	270	470	470	470		820	820
			160			300			510			910

Fig. 1.3. Seriile de valori nominale în funcție de clasele de toleranță.

rezistență critică, R_{nc}, care poate fi utilizată simultan la cei doi parametri nominali și care este dată de relația:

$$R_{nc}=\frac{U_n^2}{P_n}$$

Deci, în aceeași clasă de putere și tensiune, toate valorile rezistoarelor (în afară de valoarea egală cu R_{nc}) sînt limitate fie de tensiune, fie de putere; în tabelul 1.2 sînt indicate tensiunile limită corespunzătoare unor puteri nominale uzuale ale rezistoarelor.

Tabelul 1.2

Tensiunile nominale corespunzătoare puterilor nominale (pentru rezistoarele peliculare)

P_n(W)	0,125	0,25	0.5	1	2
U_n(v)	125	250	350	500	700

— intervalul temperaturilor de lucru reprezintă intervalul de temperatură în limitele căruia se asigură funcționarea de lungă durată a rezistorului. Influența temperaturii asupra rezistenței rezistorului este pusă în evidență de coeficientul termic al rezistenței, definit astfel:

$$\alpha_R=\frac{1}{R}\,\frac{\Delta R}{\Delta T}\ [1/\mathrm{K}] \qquad \text{sau} \qquad \alpha_R=\frac{1}{R}\,\frac{dR}{dT}\ [1/\mathrm{K}]$$

Pentru o variație liniară cu temperatura coeficientul devine:

$$\alpha_R = \frac{1}{R_1} \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \text{ [1/K]}$$

unde R_1 și R_2 reprezintă rezistența rezistorului la temperatura T_1 (temperatura normală) și respectiv la temperatura T_2.

— coeficientul de variație a rezistenței la acțiunea unor factori externi cum ar fi depozitare, umiditate, îmbătrînire etc. este dat de relația:

$$K_R = \frac{R_2 - R_1}{R} 100 \text{ [\%]}$$

unde R_1 și R_2 sînt valorile rezistenței înainte și după acțiunea factorului considerat.

— tensiunea electromotoare de zgomot reprezintă valoarea eficace a tensiunii electromotoare care apare la bornele rezistorului în mod aleatoriu și care se datorește mișcării haotice și mișcării termice a electronilor precum și trecerii curentului prin rezistor; este exprimată în µV.

— precizia rezistoarelor. În funcție de performanțe (toleranță, tensiune de zgomot, valori maxime admisibile ale coeficienților de variație) rezistoarele se împart în clase de precizie. Denumirea clasei de precizie: 0,5; 2,5; 7; 15, este dată, de obicei, de coeficientul de variație la îmbătrînire după 5 000 de ore de funcționare la sarcină nominală.

În funcție de precizia lor, rezistoarele se împart în trei categorii: rezistoare etalon, de precizie și de uz curent; caracteristicile lor sînt prezentate în tabelul 1.3.

Tabelul 1.3

Caracteristicile diferitelor categorii de rezistoare

Categoria de rezistoare	Toleranță [%]	Tensiune de zgomot	Valori ale coeficienților de variație
rezistoare etalon	±1/±2,5	≤1 µV	foarte mici
rezistoare de precizie	±2.5/±5	<1 µV	medii
rezistoare de uz curent	±5/±10/±20	<15 µV	mari

1.3. SIMBOLIZAREA ȘI MARCAREA REZISTOARELOR

Rezistoarele sînt reprezentate convențional printr-o serie de simboluri, conform STAS 11381/6-80; în figura 1.4 sînt ilustrate aceste simboluri, iar semnificația lor este dată în continuare:

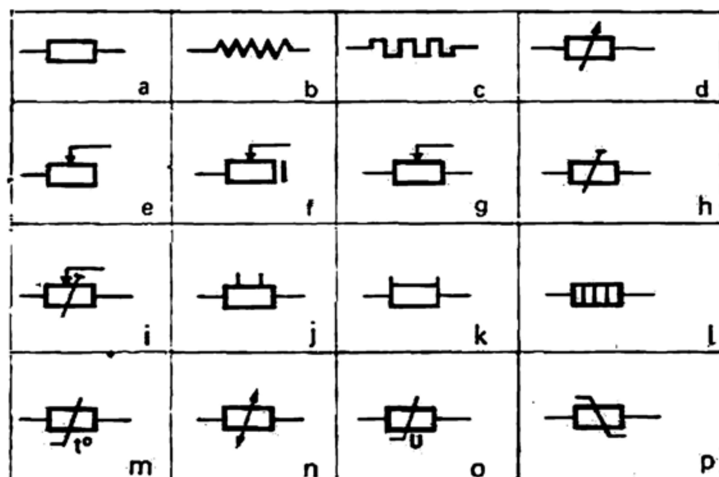


Fig. 1.4. Reprezentarea convențională pentru diferite tipuri de rezistoare.

a: rezistor, semn general
b: rezistor, semn tolerat
c: rezistor, semn nestandardizat
d: rezistor cu rezistență variabilă
e: rezistor cu contact mobil
f: rezistor cu contact mobil, cu poziție de întrerupere
g: potențiometru cu contact mobil
h: potențiometru cu contact mobil, semn tolerat
i: potențiometru cu ajustare predeterminată
j: rezistență cu două prize fixe
k: șunt
l: element de încălzire
m: rezistor cu rezistență neliniară, dependentă de temperatură (termistor)
n: rezistor cu rezistența neliniară, dependentă de temperatură, semn tolerat.
o: rezistor cu rezistență neliniară, dependentă de tensiune (varistor)
p: rezistor cu rezistență neliniară, dependentă de tensiune (varistor), semn tolerat

Rezistorul este marcat în clar sau codificat (prin inele, benzi, puncte) sau prin simboluri alfanumerice codificate internațional; indiferent de modalitatea adoptată, în mod obligatoriu se înscrie pe orice tip de rezistor:

— rezistența nominală, R_n, cu unitatea ei de măsură în clar, în cod literal sau codul culorilor;

— toleranța valorii nominale în clar (în %), în cod literal sau codul culorilor.

Marcarea rezistoarelor în codul culorilor este ilustrată în fig. 1.5.

Culoare		Prima cifră	A doua cifră	Coeficient de multiplicare	Toleranța
	Argintiu			10^{-2}	±10%
	Auriu			10^{-1}	±5%
	Negru		0	1	
	Maro	1	1	10	±1%
	Roșu	2	2	10^2	±2%
	Portocaliu	3	3	10^3	
	Galben	4	4	10^4	
	Verde	5	5	10^5	
	Albastru	6	6	10^6	
	Violet	7	7	10^7	
	Gri	8	8	10^8	
	Alb	9	9	10^9	
	Nici o culoare				±20%

Fig. 1.5. Marcarea rezistoarelor în codul culorilor.

Figura 1.6 indică codificarea literală a coeficienților de multiplicare la valorile rezistenței exprimate în ohmi, și codificarea literală a toleranței. Cî-

Factor de multiplicare	Litera
1	R
10^3	K
10^6	M
10^9	G
10^{12}	T

a

Toleranța %	Litera
±0,1	B
±0,25	C
±0,5	D
±1	F
±2	G
±5	J
±10	K
±20	M
±30	N

b

Fig. 1.6. Codificarea literală: *a*) a coeficienților de multiplicare la valorile rezistenței exprimată în ohmi; *b*) a toleranței valorii rezistenței.

teva exemple de marcare a rezistenței prin codificare în litere și cifre și în codul culorilor sînt ilustrate în figura 1.7. Pentru unele tipuri de rezis-

Valoarea rezistenței	Codificarea cu litere și cifre		Codificarea în codul culorilor
0,75Ω ± 5%	R75 J	0,75 ±5%	
180Ω ± 10%	180RK	180 ±10%	
4,7KΩ ± 5%	4K7J	4,7K	
560KΩ ± 10%	560K	560K ± 10%	
62MΩ ± 5%	62MJ	62M ± 5%	
3,3GΩ ± 20%	3G3M	3,3G ± 20%	

Fig. 1.7. Exemple de codificare a valorii nominale a rezistenței rezistorului.

toare se înscriu în mod obligatoriu următoarele mărimi:

— puterea disipată nominală, P_n, în clar, în cazul rezistoarelor de putere. Pentru rezistoarele peliculare puterea nu se marchează, ci se recunoaște după dimensiunile rezistorului.

În schemele electrice, marcarea convențională a puterii nominale a rezistoarelor se face ca în figura 1.8.

— coeficientul de temperatură al rezistenței α, (numai la rezistoarele cu peliculă metalică sau din oxizi metalici), în cod literal sau de culori.

— tensiunea nominală limită, U_{nlim}, la rezistoarele pentru înaltă tensiune, în clar sau în cod literal.

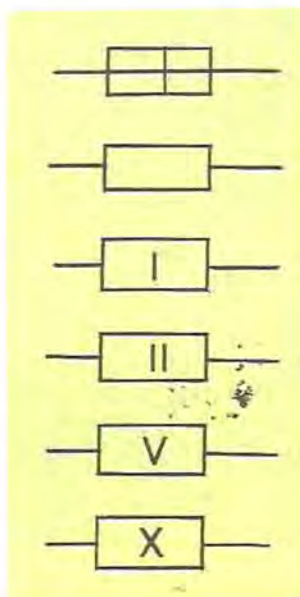


Fig. 1.8. Marcarea convențională a puterii nominale a rezistoarelor în schemele electrice. De sus în jos: 0,25 W; 0,5 W; 1 W; 2 W; 5 W; 10 W.

1.4. REZISTOARE FIXE

1.4.1. REZISTOARE PELICULARE

Se ştie că pentru un conductor de secţiune S şi de lungime l, dintr-un anumit material caracterizat prin rezistivitatea ρ, rezistenţa lui electrică este dată de relaţia următoare

$$R=\rho \frac{l}{S}.$$

Dependenţa rezistenţei de aceşti parametri este ilustrată în figura 1.9.

În proiectarea şi realizarea rezistoarelor se foloseşte principial relaţia de mai sus, dar materialele utilizate şi modalităţile de fabricaţie a rezistoarelor reale sînt destul de variate, permiţînd obţinerea acestora într-o gamă largă de valori şi de puteri. [5], [6], [29]

Rezistoarele cele mai frecvent utilizate în industria electronică datorită preţului de cost mic sînt rezistoarele peliculare. La noi în ţară, la I.P.E.E. Curtea de Argeş, se fabrică trei tipuri de rezistoare peliculare:

a) rezistoare cu peliculă de carbon

b) rezistoare cu peliculă de nichel

c) rezistoare cu peliculă de oxizi metalici (cu glazură metalică)

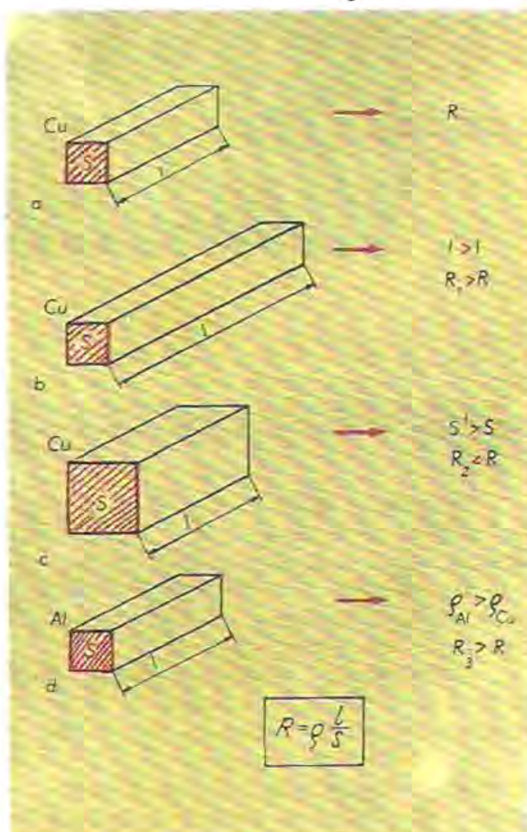


Fig. 1.9. Calculul rezistenţei unui conductor: *a*) conductor de cupru, de lungime *l*, secţiune *S*; *b*) dependenţa rezistenţei de lungimea conductorului; *c*) dependenţa rezistenţei de secţiunea conductorului; *d*) dependenţa rezistenţei de natura conductorului.

a) *Rezistoarele cu peliculă de carbon* au formă cilindrică, terminalele axiale şi sînt de mărimi diferite în funcţie de puterea nominala disipată. Structura unui astfel de rezistor este dată în figura 1.10: pe un tronson ceramic *1*, este depusă prin piroliză o peliculă de carbon *2*, care este filetată pentru a creşte şi ajusta valoarea rezistenţei pînă la valoarea nominală dorită. La capetele tronsonului, peste pelicula de carbon se depune o peliculă metalică din nichel, *4*, care

permite realizarea contactului dintre elementul rezistiv şi terminalul *6*. Lipirea terminalelor la tronsonul rezistiv se face prin sudura cu un aliaj de lipit (fludor), *5*, din plumb, staniu şi decapant din colofoniu. Rezistorul este protejat cu o peliculă de vopsea (lac dielectric).

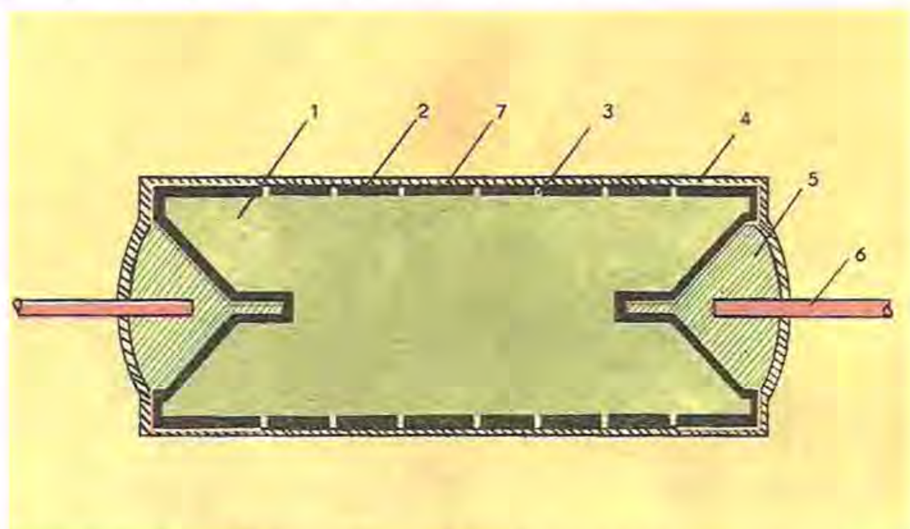


Fig. 1.10. Structura internă a unui rezistor cu peliculă de carbon: *1* — tronson ceramic; *2* peliculă de carbon; *3* — şanţ filetat în pelicula de carbon pînă la tronsonul ceramic; *4* — peliculă metalică; *5* — aliaj de lipit; *6* — terminal; *7* — peliculă de vopsea protectoare.

Pelicula rezistivă de carbon se obţine în urma unei reacţii chimice — piroliza — de descompunere a unei hidrocarburi saturate (metan, benzen, keptan, benzină de extracţie) în atmosferă de azot sau gaz inert. Principial, o astfel de reacţie se obţine într-o instalaţie ilustrată în figura 1.11 şi alcătuită dintr-un rezervor de hidrocarbură *1*, rezervor de azot *2*, şi un cuptor electric *3*, cu temperatura constantă.

Tronsoanele ceramice intră în cuptor pe o bandă transportoare *4*; în incinta acestuia, la un anumit regim termic, are loc descompunerea hidrocarburii şi depunerea stratului de carbon pe tronson.

Stratul de carbon depus poate fi strict controlat pentru că este dependent de temperatura cuptorului, de compoziţia amestecului hidrocarbură-azot şi de viteza de trecere a tronsoanelor prin cuptor.

Fazele tehnologice de fabricare a rezistoarelor cu peliculă de carbon sînt ilustrate în figura 1.12. Materialele ceramice amestecate cu un liant formează o pastă din care se presează tronsonul la dimensiunile dorite (în funcţie de puterea nominală); după piroliză şi depunerea peliculei de Ni la capete, tronsonul este spiralizat pentru a se ajunge la valoarea nominală dorită pentru rezistor; tronsonului astfel obţinut i se lipesc prin sudură terminalele din sîrmă de cupru dublu cositorită; rezistorul astfel format este acoperit cu vopsea protectoare şi apoi marcat. Rezistoarele cu peliculă de carbon se realizează la următoarele puteri nominale: 0,25 W, 0,5 W, 1 W şi 2 W, figura 1.13.

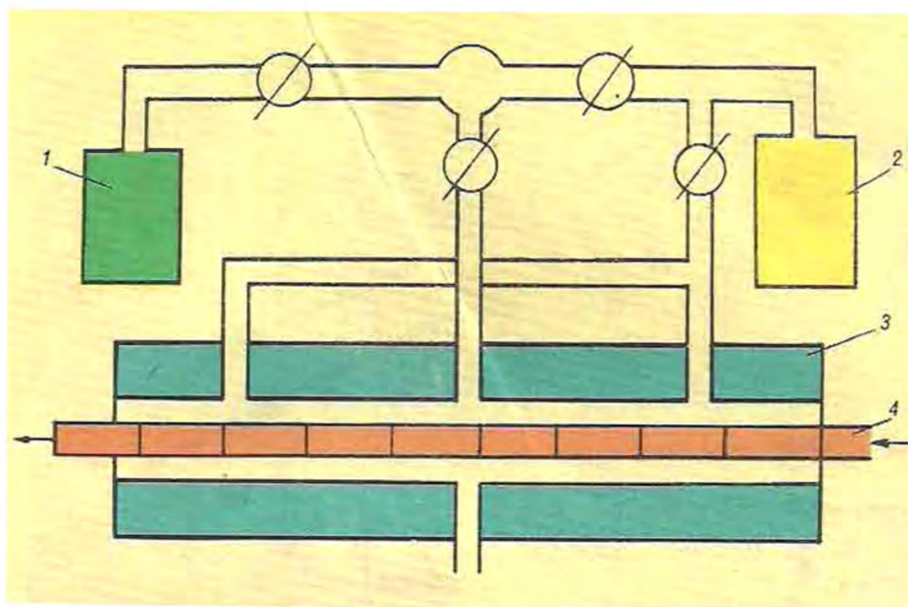


Fig. 1.11. Procedeu continuu de obţinere a rezistoarelor cu peliculă de carbon: *1* — rezervor cu hidrocarbură; *2* — rezervor de azot; *3* — cuptor electric; *4* — bandă transportoare.

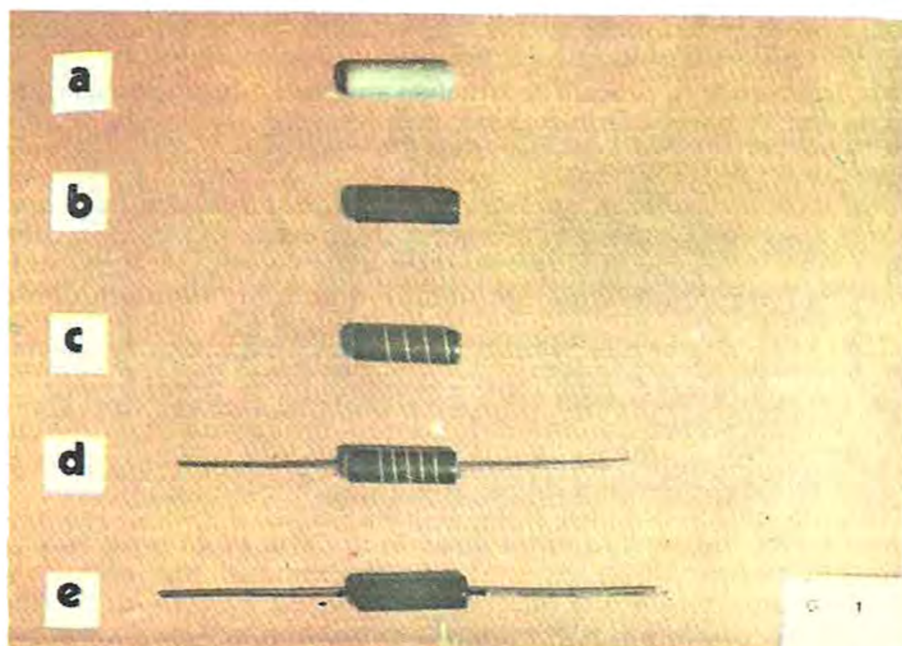


Fig. 1.12. Fazele tehnologice de fabricare ale rezistoarelor cu peliculă de carbon: *a* — tronson ceramic; *b* — tronson acoperit cu pelicula de carbon şi metalizat la capete; *c* — tronson spiralizat; *d* — tronson cu terminale sudate; *e* — rezistor vopsit.

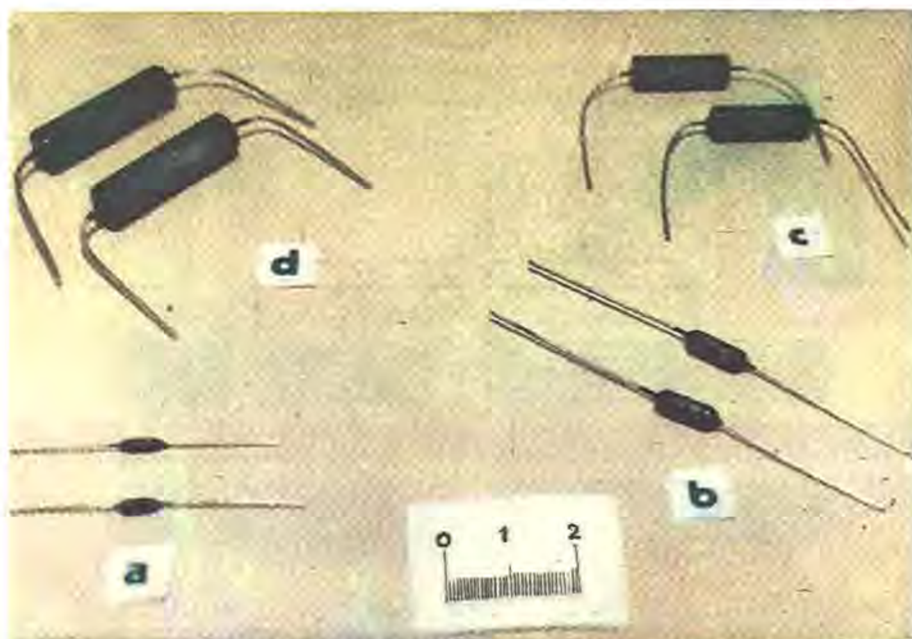


Fig. 1.13. Rezistoare peliculare de puteri diferite: *a* — rezistoare de 0,25 W; *b* — rezistoare de 0,5 W; *c* — rezistoare de 1 W; *d* — rezistoare de 2 W.

b) *Rezistoarele cu peliculă de nichel* au un proces tehnologic asemănător cu cel descris mai sus. Deosebită este însă depunerea elementului rezistiv pe tronsonul ceramic: pe toată suprafaţa tronsonului se obţine o peliculă de nichel prin depunerea chimică de grosime <100 µm (cu cît pelicula este mai subţire, cu atît se obţine o valoare nominală mai mare). Urmează apoi spiralizarea, lipirea terminalelor, protejarea şi marcarea rezistoarelor astfel obţinute (sînt identice la înfăţişare cu rezistoarele cu peliculă de carbon). Acest proces tehnologic este folosit pentru obţinerea valorilor nominale mici, între 1 Ω÷330 Ω.

Caracteristicile nominale ale rezistoarelor peliculare sînt date în tabelul 1.4.

c) *Rezistoarele cu peliculă de oxizi metalici* (sau cu glazură metalică) sînt componente profesionale caracterizate prin precizie şi stabilitate ridicate, coeficient de variaţie cu temperatura scăzut, dimensiuni mici, dar şi coeficient (factor) de zgomot ridicat.

Suportul izolant este plan şi din alumină (material ceramic special). În prima etapă, suportul izolant se realizează la dimensiuni mari, ceea ce permite realizarea a 100÷200 „cipuri" rezistive simultan (fig. 1.14). Prin serigrafie se depune pe aceste cipuri o peliculă de Ag-Pd (care va permite conectarea terminalelor) şi apoi o peliculă rezistivă formată din oxizi metalici. Fixarea acestor pelicule se obţine prin tratament termic.

Serigrafierea peliculei rezistive nu permite obţinerea exactă a valorii nominale şi urmează o ajustare la valoarea dorită în limitele clasei de tole-

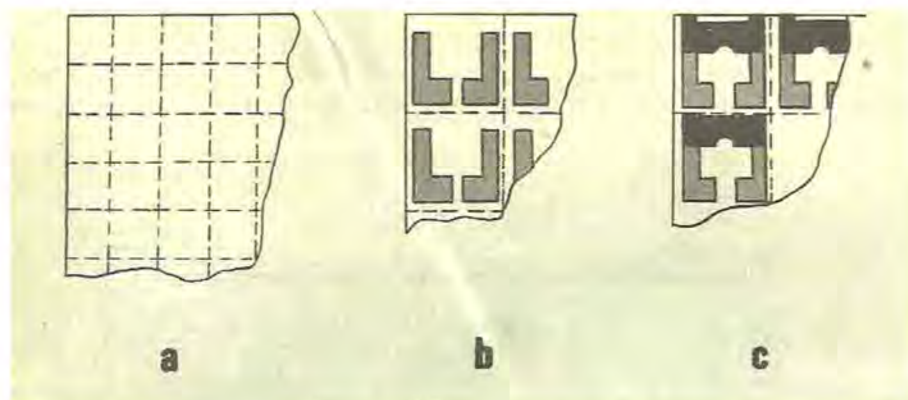


Fig. 1.14. Formarea „cipului" rezistiv: *a*) suport din alumină; *b*) suport cu pelicula Ag-Pd depusă; *c*) suport cu elementul rezistiv depus.

ranță fixate. Ajustarea se face automat, cu ajutorul unor capete de măsură care explorează placa suport cip cu cip și comandă un jet de pulbere abrazivă care înlătură surplusul de peliculă rezistivă pînă cînd valoarea obținută se înscrie în clasa de toleranță fixată.

Separarea cipurilor rezistive se face cu laser; prin sudură cu aliaj de lipit se asigură plasarea terminalelor din cupru pe zonele de Ag-Pd. Protecția rezistorului astfel obținut (fig. 1.15) se face prin acoperire cu rășină termodură, urmată de ceruire. Parametrii principali ai acestor rezistoare sînt dați în tabelul 1.4.

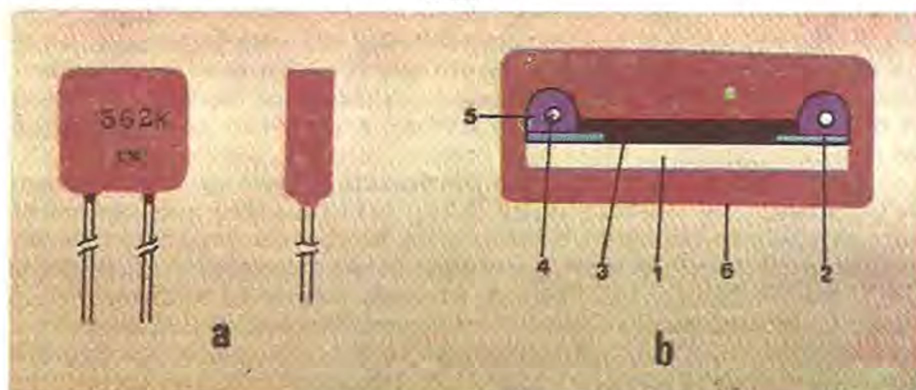


Fig. 1.15. Rezistor cu peliculă de oxizi metalici: *a*) vedere; *b*) structură; *1* — suport de alumină, *2* — peliculă de Ag-Pd, *3* — peliculă rezistivă, *4* — terminal, *5* — aliaj de lipit, *6* — rășină termodură.

Prin aceeași tehnologie se obțin și rezistoare pentru înaltă tensiune (pînă la 4KV), rețele rezistive (conținînd cel mult 20 de rezistoare de precizie), rețele de atenuare (conținînd un număr variabil de rezistoare conectate în scheme de atenuatoare).

1.4.2. REZISTOARE BOBINATE

Pentru circuite în care intervin puteri disipate mari (de la 1 W pînă la 250 W) se folosesc rezistoarele bobinate (cimentate sau în corp ceramic).

Structura internă a unui rezistor bobinat cimentat este redată în *figura 1.16.*

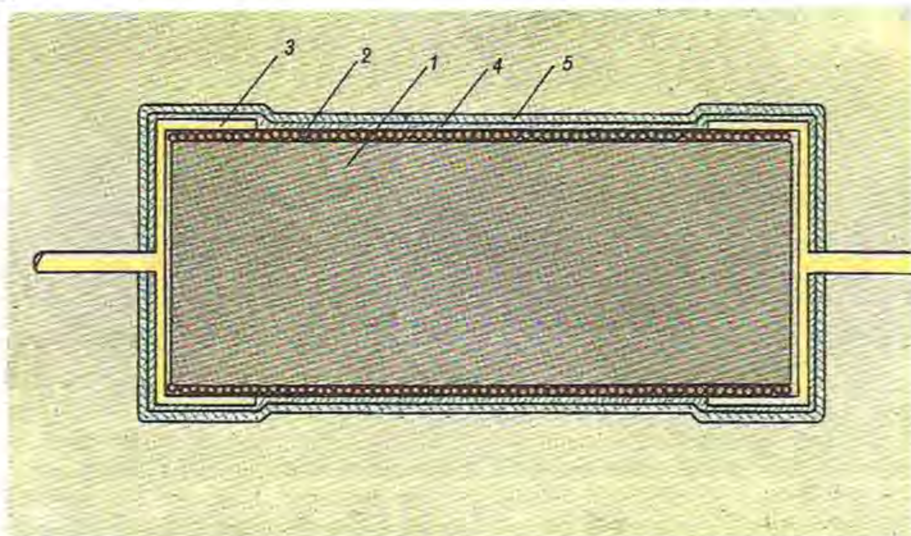


Fig. 1.16. Structura internă a unui rezistor bobinat cimentat: *1* — tronson din fibră de sticlă; *2* — fir rezistiv bobinat; *3* — terminal cu căpăcel; *4* — strat de ciment; *5* — peliculă de vopsea.

Rezistorul bobinat cimentat este alcătuit dintr-un tronson din fibre de sticlă *1*, pe care se spiralează un fir rezistiv *2*; pentru realizarea contactelor exterioare se folosesc terminale axiale prevăzute cu căpăcele, *3*. Protecția se realizează cu un strat de ciment siliconic *4*, peste care se aplică o peliculă de vopsea *5*.

Rezultatele principalelor faze ale fluxului tehnologic pentru acest tip de rezistoare, sînt ilustrate în fig. 1.17: prin răsucirea unui mănunchi de fibre de sticlă se obține un tronson continuu cu bune proprietăți mecanice, termice și electrice; pe acest tronson se bobinează un fir rezistiv din aliaj Cu-Ni sau Cr-Ni care este fixat pe tronson cu ajutorul unui lac dielectric. Din acest tronson bară se taie tronsoane rezistive de lungime necesară obținerii unei anumite valori nominale (toate aceste operații se execută la o instalație complexă complet automată); tronsonul este prevăzut cu terminale axiale cu căpăcele care se conectează prin presare; rezistorul astfel obținut este protejat prin acoperire cu un strat de ciment siliconic; urmează apoi vopsirea și marcarea acestuia.

Rezistoarele fabricate prin această tehnologie la I.P.E.E. — Curtea de Argeș pot atinge puteri pînă la 9 W.

Pentru puteri cuprinse în domeniul 2 W÷20 W se folosesc rezistoare bobinate introduse în corp ceramic. Procesul tehnologic de obținere a tronsonului rezistiv echipat cu terminale cu căpăcele este similar celui descris mai

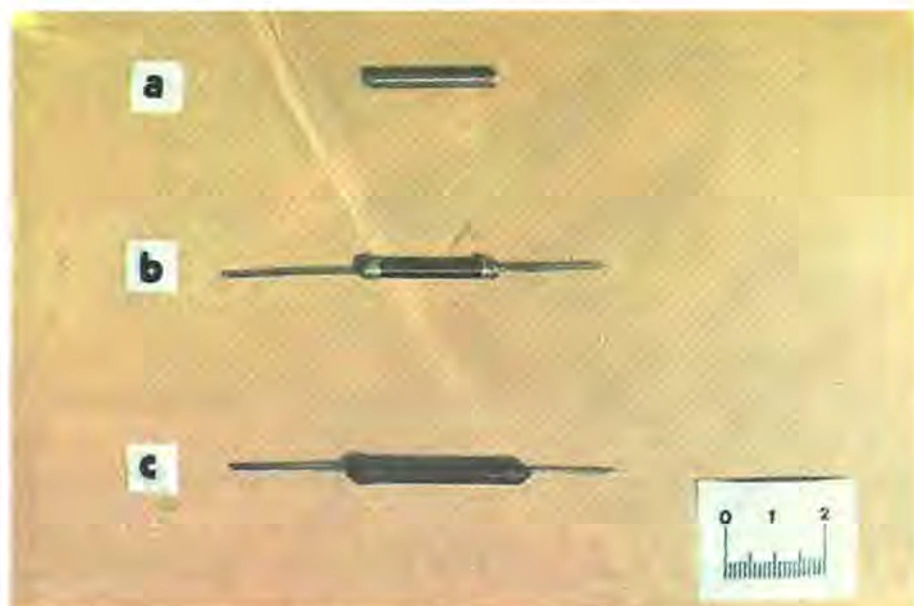


Fig. 1.17. Fazele tehnologice de fabricare ale rezistoarelor bobinate, cimentate: *a* — tronson de fibră de sticlă cu fir conductor spiralat și fixat pe suport; *b* — tronson rezistiv prevăzut cu terminale cu căpăcele fixate prin presare; *c* — rezistor protejat cu un strat de ciment siliconic.

sus. Figura 1.18 reproduce fazele tehnologice de fabricație ale acestei componente:

a — obținerea tronsonului cu conductor spiralizat

b — fixarea prin presare a terminalelor neegale prevăzute cu căpăcele

c — obținerea corpului ceramic (prin tehnologie proprie materialelor ceramice) care poate fi tubular, cu secțiune pătrată sau profilat de diferite dimensiuni

d — rezistorul este introdus în acest corp ceramic; spațiul liber rămas se umple cu material izolant (nisip cuarțos) și la capete se cimentează (cu ciment siliconic).

În afară de aceste două tipuri de rezistoare de putere folosite în aparatura electronică, se mai realizează la noi în țară rezistoare bobinate antiparazitare și rezistoare bobinate de mare putere.

Rezistoarele bobinate antiparazitare sînt folosite la motoarele auto pentru antiparazitare. Ele constau dintr-un suport izolant (fibre de sticlă) pe care se bobinează un fir conductor fixat cu ajutorul unui lac dielectric; terminalele sînt sub forma unor căpăcele stanate care prin presare realizează contactul electric cu firul rezistiv, la capetele tronsonului; sînt acoperite cu un lac protector.

Rezistoarele bobinate de putere sînt construite prin bobinarea unui fir conductor pe un suport ceramic tubular; pot fi fixe sau reglabile, iar protecția se realizează fie prin cimentare (strat de ciment siliconic, terminalele fiind coliere radiale de care se pot atașa cabluri lițate, papuci etc.) sau prin glazurare (terminalele sînt plate, fixate la capete).

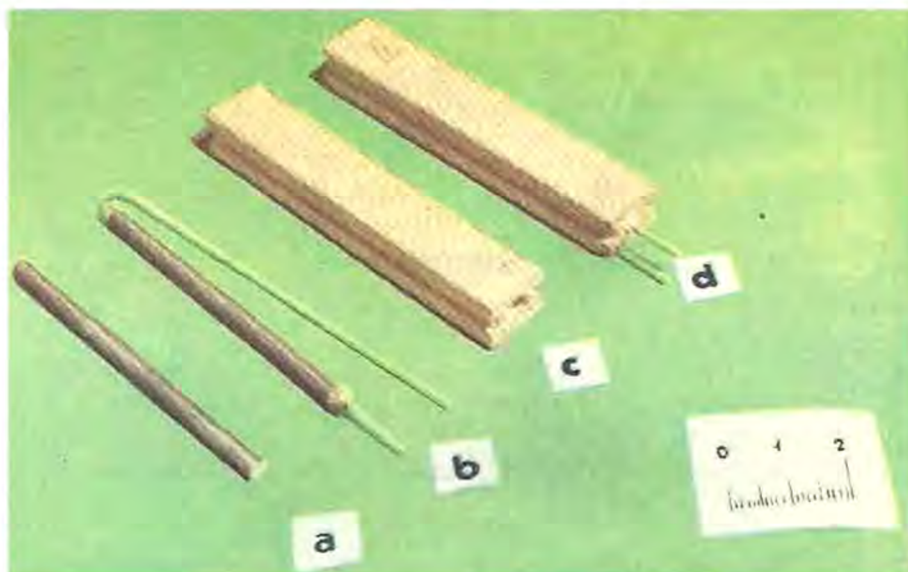


Fig. 1.18. Fazele tehnologice de fabricare ale unui rezistor bobinat introdus în corp ceramic: *a* — tronson rezistiv; *b* — tronson cu terminalele fixate; *c* — corp ceramic; *d* — produs final.

Acest tip de rezistoare se construiesc pentru puteri cuprinse între 5÷250 W.

1.4.3. REZISTOARE DE VOLUM

Rezistoarele de volum sînt realizate dintr-un amestec de material conductor (grafit, negru de fum) și un material izolant de umplutură (talc, bioxid de titan, caolin etc.). Structura internă a unui astfel de rezistor este ilustrată în fig. 1.19 *a*, iar schema electrică echivalentă între trei granule de material conductor cuprinde: R_g — rezistența granulei, R — rezistența dintre granule, iar C_g — capacitatea parazită, fig. 1.19 *b*.

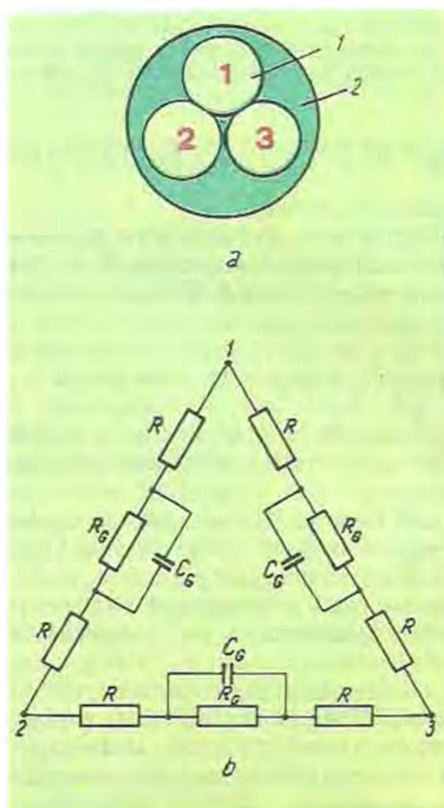


Fig. 1.19. Rezistor de volum: *a*) Structura internă: *1* — granulă de material conductor, *2* — material izolant; *b*) schema electrică echivalentă.

Acest tip de componente are o tehnologie simplă și prezintă robustețe electrică și mecanică bună, dar majoritatea proprietăților electrice sînt inferioare altor tipuri. Nu sînt rezistoare de precizie și nu se fabrică în țara noastră.

*
* *

În tabelul care urmează sînt cuprinși parametrii electrici esențiali ai rezistoarelor fabricate în țară, la I.P.E.E. — Curtea de Argeș.

Tabelul 1.4

Parametrii electrici importanți ai rezistoarelor fabricate la I.P.E.E. — Curtea de Argeș

Tipul rezistorului	Seria	Valoare nominală	Toleranță ±[%]	Putere [W]
— rezistoare cu peliculă de carbon	RCG	330 Ω÷1 MΩ	2,5/5/10/20	0,25; 0,5; 1; 2
— rezistoare cu peliculă metalică	RMG	1 Ω÷330 Ω	2,5/5/10/20	0,125; 0,25; 0,5; 1; 2
— rezistor cu peliculă oxizi metalici	RPM	50 Ω÷2 MΩ	0,25/0,5/1/2/5	0,125; 0,25; 0,5; 1
— rezistoare pentru înaltă tensiune	HVR	1 MΩ÷100 MΩ	5/10	U_{nlim}=4 kV
— rețele rezistive			0,25/0,5/1/5	0,125; 0,25; 0,5
— rețele de atenuare		0,5 Ω÷10 Ω 10 Ω÷1 MΩ	5/10 1	0,5 0,5
— rezistoare bobinate cimentate	RBC	0,1 Ω÷39 kΩ	5/10	1÷9
— rezistoare bobinate în corp ceramic (cu terminale axiale)	RBA	0,1 Ω÷68 kΩ	5/10	2÷20
— rezistoare bobinate în corp ceramic (cu terminale radiale)	RBT	1 Ω÷68 kΩ	5/10	10÷16
— rezistoare bobinate pentru antiparazitare	RB-EA	510 Ω÷13 kΩ	5/10	
— rezistoare bobinate de putere, cimentate	RBP RBR	1 Ω÷68 kΩ	5/10	5÷250
— rezistoare bobinate de putere glazurate, fixe și reglabile	RGF	1 Ω÷200 kΩ	5/10	16÷250

1.5. CONECTAREA ÎN SERIE, PARALEL ȘI MIXTĂ A REZISTOARELOR

În circuitele electronice, uneori, este nevoie de o anumită valoare de rezistență care nu se găsește ca valoare nominală în seriile de valori; prin conectarea în serie, paralel sau mixtă (combinată) a mai multor rezistoare, se poate ajunge la valoarea dorită (fig. 1.20).

Astfel, două rezistoare de rezistențe R_1 și R_2 conectate în serie, pot fi echivalente cu un rezistor a cărui rezistență R_e este egală cu suma celorlalte două:

$$R_e=R_1+R_2$$

Pentru n rezistoare legate în serie, rezistența echivalentă este dată de suma rezistențelor componente (fig. 1.20 a).

$$R_e=R_1+R_2+\ldots+R_n=\sum_{i=1}^{n} R_i$$

Două rezistoare R_1 și R_2 legate în paralel sînt echivalente cu un rezistor a cărui rezistență este dată de relația:

$$\frac{1}{R_e}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}, \qquad R_e=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

Pentru n rezistoare legate în paralel (fig. 1.20 b) rezistența echivalentă este dată de relația:

$$\frac{1}{R_e}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots\frac{1}{R_n}$$

Conectarea mixtă (combinată) a rezistoarelor ilustrată în fig. 1.20 c, permite obținerea unei rezistențe echivalente dată de relația

$$R_e=R_1+R_2+\frac{R_3R_4}{R_3+R_4}$$

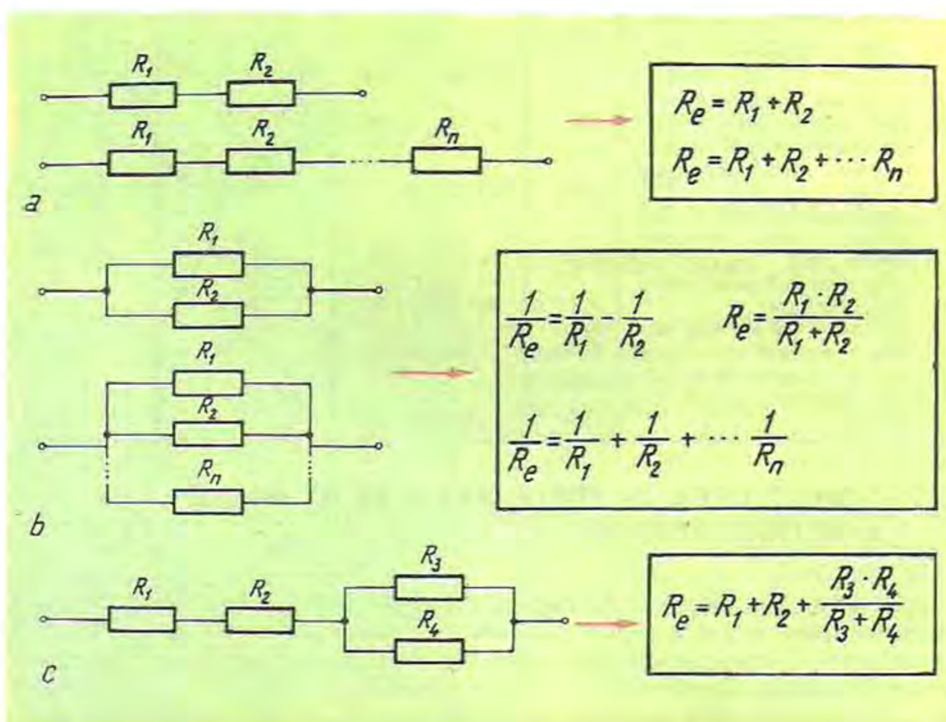


Fig. 1.20. Conectarea rezistoarelor: *a*) în serie; *b*) în paralel; *c*) mixtă.

Relaţiile de mai sus se pot deduce simplu aplicînd o tensiune U reţelei propuse şi calculînd curentul I care o străbate, folosind legea lui Ohm şi legile lui Kirchoff.

Pentru exemplificare să calculăm, folosind relaţiile de mai sus, rezistenţa echivalentă a reţelei ilustrată în fig. 1.21. Vom avea:

$$R_{89}=R_8||R_9=\frac{R_8R_9}{R_8+R_9} \qquad R_{e1}=R_4+R_{89}=R_4+\frac{R_8R_9}{R_8+R_9}$$

$$\frac{1}{R_{567}}=\frac{1}{R_5}+\frac{1}{R_6}+\frac{1}{R_7} \qquad R_{567}=\frac{R_5R_6R_7}{R_5R_6+R_5R_7+R_6R_7}$$

$$R_{e2}=R_{10}+R_{567} \qquad R_{e3}=R_{e1}||R_{e2}=\frac{R_{e1}R_{e2}}{R_{e1}+R_{e2}}$$

$$R_{e4}=R_1+R_{e3} \qquad R_{23}=R_2||R_3=\frac{R_2\cdot R_3}{R_2+R_3}$$

$$R_e=R_{e4}||R_{23}=\frac{R_{e4}\cdot R_{23}}{R_{e4}+R_{23}}$$

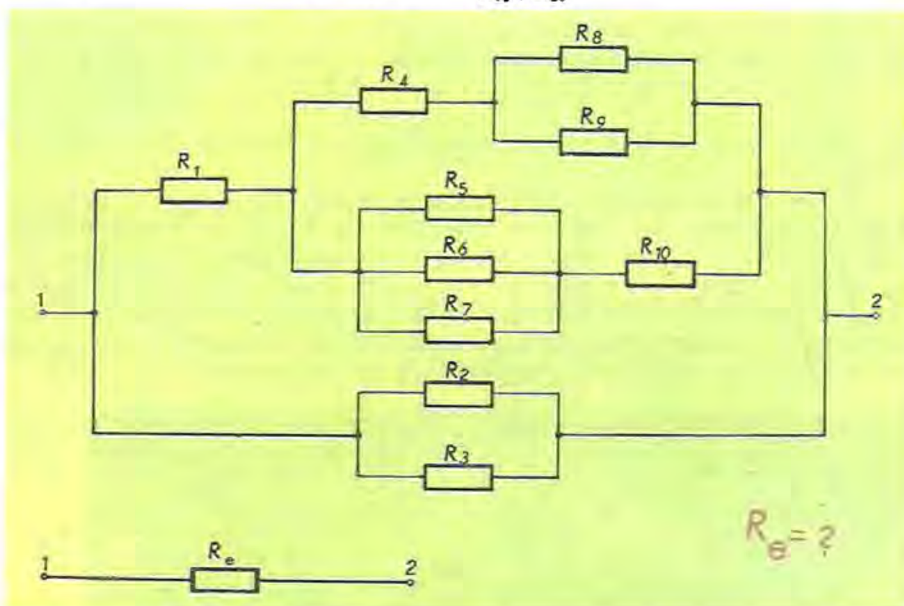


Fig. 1.21. Problemă privind calculul rezistenţei echivalente.

1.6. COMPORTAREA ÎN CURENT ALTERNATIV A REZISTORULUI

Pentru a se vedea cum se comportă în curent alternativ un rezistor idealizat (fără elemente parazite), de rezistenţă R, să considerăm circuitul din fig. 1.22, unde un generator de tensiune alternativă va debita pe rezistorul R un curent $i(t)$.

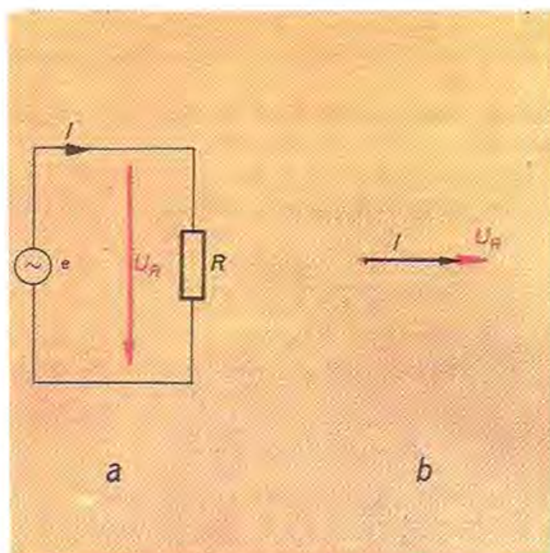


Fig. 1.22. Comportarea în curent alternativ a rezistorului: *a*) schema electrică; *b*) diagrama fazorială.

Relația dintre tensiunea u_R care apare la bornele rezistorului R și curentul $i(t)$ care îl străbate este, conform legii lui Ohm:

$$u_R = Ri(t)$$

Dacă: $i(t) = I \sin \omega t$

unde: I=amplitudinea (valoarea maximă) a curentului,

$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ = pulsația, T=perioada,

f=frecvența semnalului sinusoidal,

i, u — valoarea instantanee a curentului și respectiv a tensiunii,

atunci expresia tensiunii la bornele rezistorului devine:

$$u_R(t) = RI\sin \omega t = U_R \sin \omega t,$$

$$U_R = RI$$

Rezultă, deci, la bornele rezistorului o tensiune sinusoidală în fază cu curentul.

O mărime sinusoidală, $A \sin \omega t$, se reprezintă de obicei printr-un vector **A** a cărui mărime este egală cu amplitudinea A și care se rotește în jurul unui punct fix O în sens trigonometric cu viteza unghiulară ω. Acest vector se numește *fazor rotitor* pentru că unghiul descris de fazor în momentul t (momentul inițial $t_i = 0$) este egal cu faza mărimii sinusoidale, ωt. Proiecția fazorului pe axa perpendiculară pe axa de referință reprezintă tocmai valoarea instantanee a mărimii sinusoidale, $A \sin \omega t$ (figura 1.23).

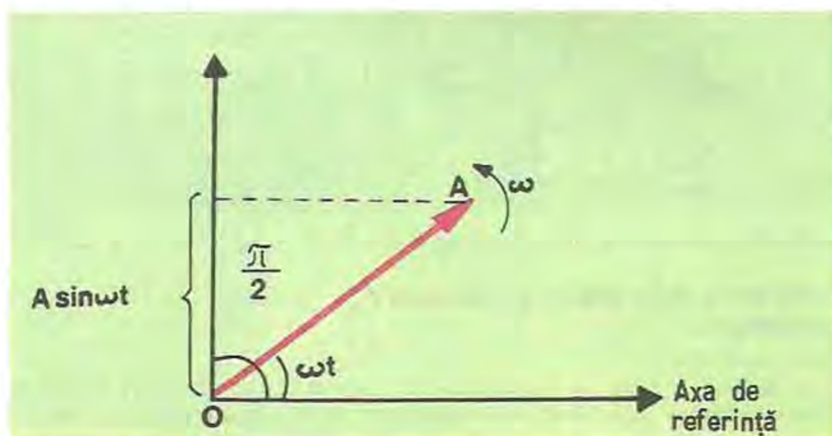


Fig. 1.23. Diagramă de fazori rotitori.

În cazul în care presupunem că axa OX se rotește cu viteza ω în sens invers trigonometric, vectorul **A** devine staționar și se numește *fazor staționar* .

Reprezentarea mărimilor sinusoidale cu ajutorul fazorilor staționari permite punerea în evidență a defazajelor dintre ele.

Astfel, pentru rezistorul R străbătut de curentul sinusoidal $i(t)= =I \sin \omega t$, diagrama fazorială este ilustrată în fig. 1.22 *b*.

Puterea absorbită de rezistor este o funcție de timp și se poate pune sub forma:

$$p=ui=U_R \sin \omega t \cdot I \sin \omega t=U_R I \sin^2 \omega t=\frac{U_R I}{2}(1-\cos^2 \omega t)$$

Dacă se calculează valoarea medie a puterii, se găsește:

$$P=\frac{U_R I}{2}=U_{Ref} I_{ef},$$

unde U_{Ref} și I_{ef} sînt valorile eficace ale mărimilor sinusoidale și sînt date de relațiile:

$$U_{Ref}=\frac{U_R}{\sqrt{2}}; \quad I_{ef}=\frac{I}{\sqrt{2}}$$

Valoarea eficace I_{ef} a unui curent $i(t)=I \sin \omega t$ este numeric egală cu intensitatea unui curent continuu care, străbătînd aceeași rezistență ca și curentul alternativ timp de o perioadă T, dezvoltă aceeași cantitate de căldură. Se deduce că:

$$I_{ef}=\frac{I}{\sqrt{2}}$$

iar expresia instantanee a curentului devine:

$$i(t)=I \sin \omega t=I_{ef}\sqrt{2} \sin \omega t$$

Dacă o mărime sinusoidală are și fază inițială expresia instantanee devine:

$$a(t)=A\sqrt{2} \sin(\omega t+\varphi)$$

În calculele circuitelor electronice, a păstra acest mod de scriere este destul de dificil, mai ales cînd apar relații ample și complicate. S-a trecut la o scriere simplificată care folosește proprietățile numerelor complexe. Folosind această scriere simplificată în complex, mărimea $a(t)$ va fi caracterizată numai de valoarea eficace A și faza inițială:

$$a(t) \Leftarrow Ae^{j\varphi}, \quad (j=\sqrt{-1})$$

Introducerea operatorului j ușurează operațiile de derivare și integrare; astfel reactanța inductivă și defazajul de $\frac{\pi}{2}$ introduse de bobină în circuit vor putea fi scrise: $jX_L=j\omega L$ iar pentru condensator: $\frac{X_C}{j}=-jX_c=\frac{1}{j\omega C}$

Aceste noțiuni ne sînt necesare pentru a analiza comportarea rezistorului real în circuit, la diferite frecvențe.

Din analiza proceselor tehnologice ale diferitelor tipuri de rezistoare rezultă că rezistorul real prezintă o serie de elemente parazite care modifică funcționarea lui, mai ales la frecvențe înalte. De exemplu rezistoarele bobi-

nate şi chiar şi cele cu peliculă dar spiralate prezintă o inductanţă parazită care, la frecvenţe mari, este supărătoare.

Rezistoarele cu peliculă de oxizi metalici au această inductanţă practic nulă.

Rezistoarele bobinate prezintă şi capacităţi parazite între spire datorită diferenţei de potenţial între ele; apar de asemenea la toate tipurile de rezistoare capacităţi parazite ale terminalelor faţă de masă.

Astfel, schema echivalentă a rezistorului tehnic real este prezentată în figura 1.24.

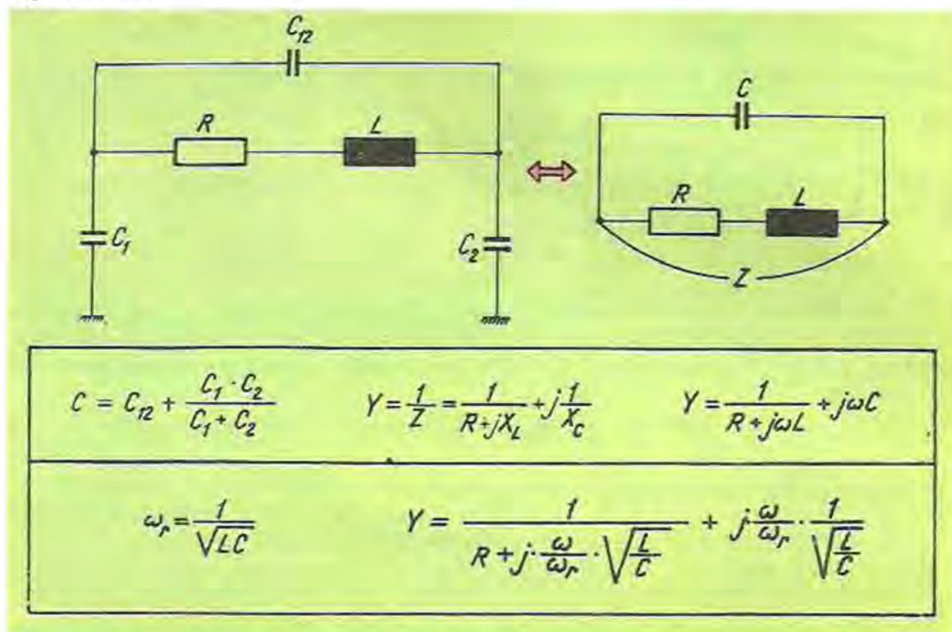


Fig. 1.24. Schema echivalentă a rezistorului tehnic real.

Dacă se notează cu C_{12} capacitatea parazită echivalentă între extremităţile rezistorului, cu C_1 şi C_2 capacităţile parazite ale terminalelor faţă de masă, şi cu L inductivitatea parazită datorată cîmpului magnetic ce apare prin fenomen de inducţie magnetică în elementul rezistiv străbătut de curent, se poate calcula o impedanţă, respectiv o admitanţă echivalentă astfel:

$$C = C_{12} + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \qquad Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R+jX_L} + j\frac{1}{X_C} = \frac{1}{R+j\omega L} + j\omega C$$

Dacă notăm $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, expresia admitanţei se poate scrie:

$$Y = \frac{1}{R + j\frac{\omega}{\omega_r}\sqrt{\frac{L}{C}}} + j\frac{\omega}{\omega_r}\frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Rezultă că:

– dacă raportul $\frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} < 1$, admitanţa are caracter capacitativ la orice frecvenţă;

— pentru $\frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}>1$, admitanța are caracter inductiv la joasă frecvență și capacitiv pentru frecvențe inalte, existînd o frecvență ω_0 pentru care circuitul se comporta aproximativ ca o rezistență pură;

— pentru $\frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}\cong 1$ circuitul se comportă aproximativ ca o rezistență pură în domeniul pentru care $\omega<0{,}3\ \omega_r$.

Prin tehnologie de fabricație adaptată se poate obține relația dorită între R și elementele parazite, într-o anumită bandă de frecvență.

1.7. APLICAȚII ALE REZISTOARELOR FIXE

Rezistoarele sînt componente frecvent utilizate în circuitele electronice, una din principalele lor aplicații fiind *divizorul de tensiune.*

Pentru un circuit ca cel din figura 1.25 *a*, cu două rezistoare în serie R_1 și R_2, cărora li se aplică tensiunea U_0, tensiunea de ieșire U_2, culeasă de pe rezistența R_2, va fi obținută prin relațiile:

$$U_0=U_1+U_2=R_1I+R_2I=(R_1+R_2)I$$

$$I=\frac{U_0}{R_1+R_2} \qquad U_2=R_2I=R_2\frac{U_0}{R_1+R_2}=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_0$$

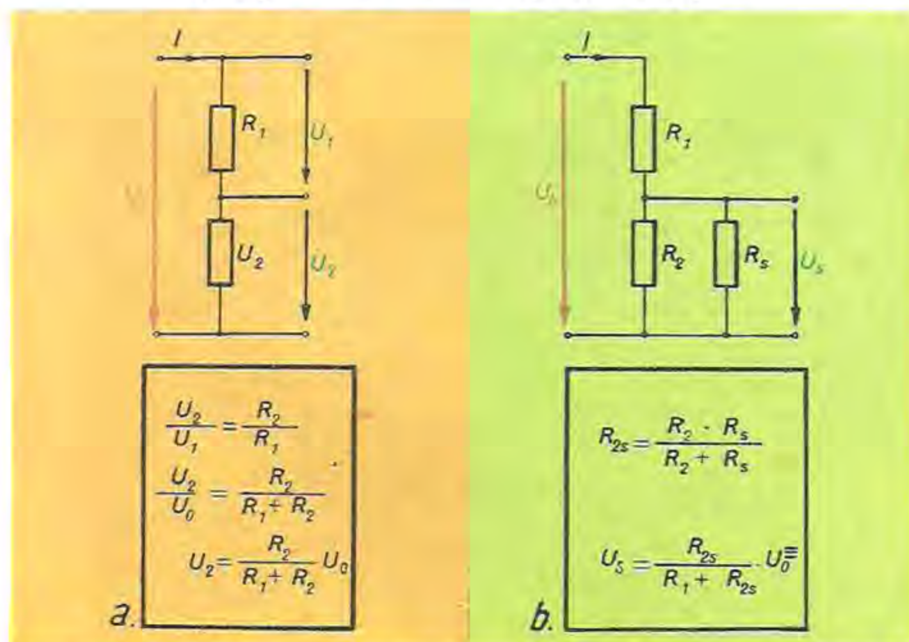


Fig. 1.25. Divizorul de tensiune: *a*) fără rezistență de sarcină; *b*) cu rezistență de sarcină.

Dacă în paralel cu R_2 se află o rezistență de sarcină R_s (fig. 1.25 *b*), atunci tensiunea de sarcină U_s va fi dată de relația:

$$U_s=\frac{R_{2s}}{R_1+R_{2s}}U_0$$

unde: $$R_{2s}=R_2||R_s=\frac{R_2R_s}{R_2+R_s}$$

O altă aplicație importantă este *divizorul de curent* (fig. 1.26). Tensiunea de ieșire U_2 este proporțională cu curentul I_2:

$$U_2=R_sI_2$$

Curentul I_2 apare în urma divizării curentului I pe cele două ramuri ale circuitului.

Dintre schemele electronice uzuale în care rezistoarele au un rol esențial amintim cîteva:

Fig. 1.26. Divizorul de curent.

— etaj de amplificare cu un tranzistor, în care rezistoarele determină punctul static de funcționare al tranzistorului *T* (fig. 1.27 *a*),
— amplificator operațional folosit ca amplificator inversor, fig. 1.27 *b*,
— generator de impulsuri dreptunghiulare a cărui frecvență este determinată de valoarea rezistoarelor și condensatoarelor din circuitul de reacție, figura 1.27 *c*.

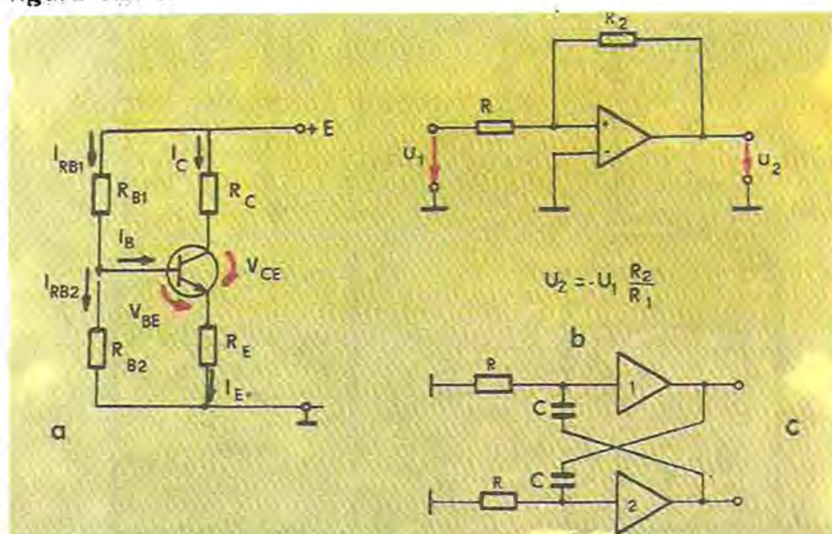


Fig. 1.27. Utilizarea rezistorului în scheme electronice: *a*) etaj de amplificare cu un rezistor; *b*) amplificator inversor; *c*) generator de impulsuri dreptunghiulare.

1.8. REZISTOARE VARIABILE ŞI SEMIVARIABILE

Rezistoarele variabile sau *potenţiometrele* sînt rezistoare a căror rezistenţă poate fi variată continuu sau în trepte între anumite limite, prin deplasarea unui contact mobil (cursor) pe suprafaţa elementului rezistiv.

În afară de parametrii electrici proprii fiecărui rezistor, *potenţiometrele* sînt caracterizate de cîţiva parametri specifici:

— rezistenţa reziduală (iniţială sau finală), R_0 [Ω]: este egală cu valoarea maximă admisibilă a rezistenţei electrice măsurate între ieşirea cursorului şi unul din terminale, cînd cursorul se află la una din extremităţile cursei de reglaj,

— rezistenţa de contact, R_k, între cursor şi elementul rezistiv,

— precizia reglării care depinde de materialul rezistiv şi de rezistenţa de contact dintre cursor şi elementul rezistiv,

— legea de variaţie a rezistenţei, care indică variaţia valorii rezistenţei electrice R ce trebuie obţinută la ieşirea potenţiometrului în funcţie de poziţia unghiulară sau liniară a cursorului. Legile de variaţie uzuale sînt:

A — liniar; *B* — logaritmic; *C* — invers logaritmic; *D* — exponenţial; *E* — invers exponenţial; *F* — dublu logaritmic; *S* — curbă în formă de *S*, sinusoidă, cosinusoidă; legile de variaţie sînt ilustrate în fig. 1.28.

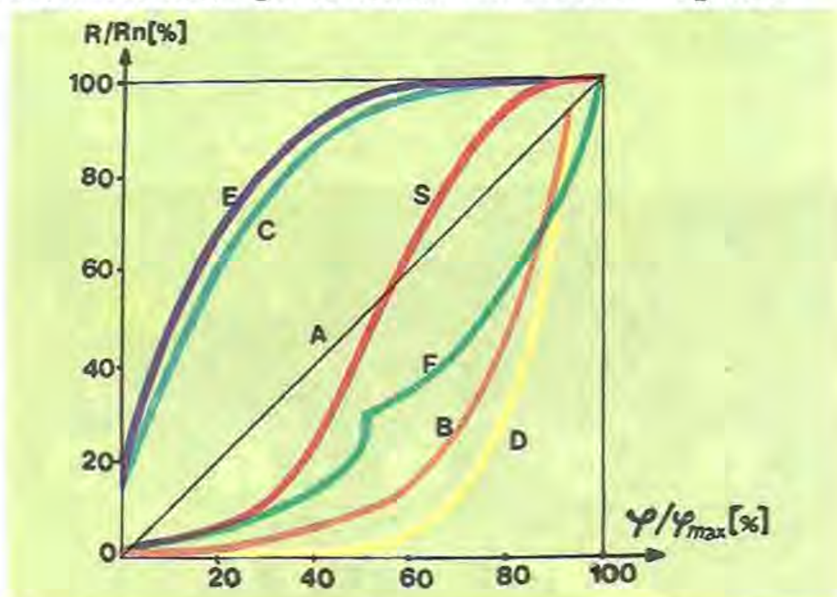


Fig. 1.28. Legile de variaţie ale potenţiometrelor: *A* — linear; *B* — logaritmic; *C* — invers logaritmic; *D* — exponenţial; *E* — invers exponenţial; *F* — dublu logaritmic; *S* — curbă în formă de *S*.

În funcţie de modul de realizare al elementului rezistiv potenţiometrele se clasifică în:

— potenţiometre peliculare: cu peliculă metalică, cu peliculă de carbon, cu peliculă metalo-ceramică (*cermet*);

— potenţiometre bobinate;

— fotopotențiometre;

După criterii constructive potențiometrele se împart în:

— simple, echipate cu un singur element rezistiv și care pot fi: circulare (cu o singură rotație), reglabile continuu (de translație), multitură (rectilinii, circulare, elicoidale), cu rotație continuă, cu întrerupător, cu comutator, cu comutator și întrerupător, potențiometru miniatură (pentru cablaje electronice)

— multiple: tandem (cu două sau mai multe secțiuni comandate de un singur ax pe care sînt fixate cursoarele); multiax, combinate cu întrerupător, miniatură.

După modul de execuție, potențiometrele se construiesc în variantă închisă, deschisă, potențiometre ajustabile (rezistențe semivariabile, cu acțiune directă asupra cursorului, folosite în operații de reglaj a circuitelor electronice).

Potențiometrele peliculare au un suport dielectric din pertinax sau alumină; elementul rezistiv este o peliculă de grafit, oxizi metalici sau peliculă cermet.

Cursorul se realizează din bronz fosforos sau aliaj Ni, Cu și Zn, rezistent la uzură. Este prevăzut cu un mic cilindru din grafit care trebuie să realizeze contactul electric în orice poziție a cursorului și să nu lezeze pelicula rezistivă.

Fazele tehnologice de obținere a potențiometrelor sînt în principiu comune cu cele de obținere a rezistoarelor; apar însă repere mecanice specifice și operații de montare menite să asigure legătura electrică a cursorului cu exteriorul și protecția componentei.

În fig. 1.29 sînt date elementele constituente ale unui potențiometru ro-



Fig. 1.29. Fazele tehnologice de fabricare a potențiometrelor peliculare: *a* — element rezistiv; *b* — suport din pertinax; *c* — cosa stîngă și dreaptă; *d* — capsă; *e* — cosa centrală; *f* — opritor; *g* — cursor; *h* — șaibă metalică; *i* — capac de plastic; *j* — resort; *k* — pană; *l* — ax; *m* — produs final.

tativ cu peliculă de carbon. Elementul rezistiv, *a*, este obţinut astfel: pe un suport circular de pertinax, prin pulverizare, se depune pelicula rezistivă de carbon, după o anumită lege de variaţie; la extrmităţile suportului se depune argint pentru a permite plasarea cosei stîngă şi dreaptă, *c*, care asigură contactele cu exteriorul ale elementului rezistiv. Acesta se plasează pe suportul de pertinax *b*; capsa *d*, cosa centrală *e* şi opritorul *f* sînt plasate pe faţa inferioară a suportului *b* prin bercluire împreună cu cursorul *g* plasat împreună cu şaiba *h*, pe faţa superioară a suportului. Cu ajutorul acestor repere se asigură fixarea cursorului şi limitarea cursei lui pe suprafaţa elementului rezistiv. Elementele următoare: capac de plastic, resortul *j*, pana *k* şi axul *l* asigură protejarea potenţiometrului şi accesul la cursor; produsul finit este dat în imaginea *m*.

Diferite tipuri de potenţiometre rotative peliculare fabricate în ţară sînt date în fig. 1.30.

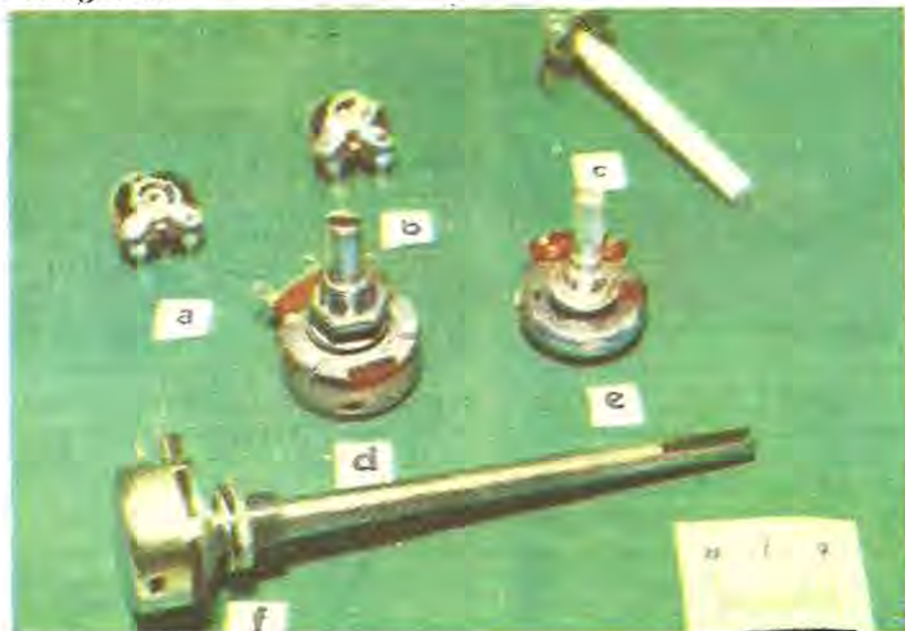


Fig. 1.30. Tipuri de potenţiometre: *a* — potenţiometru ajustabil cu peliculă de carbon şi contact de grafit, $R_n>1$ kΩ; *b* — potenţiometru ajustabil cu cursor cu ambutiu (contact metal-cărbune), $R_n<1$ kΩ; *c* — potenţiometru cu peliculă de carbon; *d* — potenţiometru cermet simplu, cu variaţie logaritmică, fără întrerupător; *e* — potenţiometru cermet simplu, cu variaţie logaritmică, cu întrerupător; *f* — potenţiometru simplu, cu variaţie lineară, fără întrerupător.

Potenţiometrele bobinate sînt folosite în circuite de putere şi constau dintr-un suport dielectric (pertinax sau material ceramic) pe care se bobinează un fir conductor. Cursorul se realizează dintr-o lamelă de oţel călită care poartă la un capăt un element de grafit sau de bronz grafitat.

În tabelul 1.5 sînt date tipurile şi caracteristicile tehnice esenţiale ale potenţiometrelor produse în ţară la I.P.E.E. — Curtea de Argeş şi I.E.I. — Bucureşti.

Codul folosit pentru potenţiometre este *P-xxxx*, iar toleranţa este $\pm20\%$ pentru $R_n\leq250$kΩ; $\pm30\%$ pentru $R_n>250$kΩ.

Tabelul 1.5

Parametrii electrici importanţi ai potenţiometrelor fabricate la I.P.E.E. — Curtea de Argeş şi I.E.I. — Bucureşti

Tip	Valoarea nominală	Toleranţă ±[%]	Putere [W]
a) potenţiometre rotative cu peliculă de carbon — simplu-linear (*A*) legile *B, C, D, E, F*	100 Ω÷5 MΩ 1 kΩ÷1 MΩ	20; 30	0,25 0,125
— simplu cu întrerupător linear logaritmic	100 Ω÷5 MΩ 1 kΩ÷1 MΩ	—	0,25 0,125
— tandem linear logaritmic	100 Ω÷5 MΩ 1 kΩ÷1 MΩ	—	0,25 0,125
b) potenţiometre cermet simple	100 Ω÷10 MΩ	5; 10; 20; 30	1; 2; 4
c) potenţiometre, ajustabile (rezistenţe semireglabile) cu peliculă de carbon cu diferite legi de variaţie *A, B, C, D, E*	100 Ω÷100 MΩ	20; 30	0,05; 0,1; 0,5
d) potenţiometre ajustabile cermet	10 Ω÷1 MΩ	20; 30 special: 10; 15	0,5; 1
e) potenţiometre rectilinii linear *B, C*	100 Ω÷5 MΩ 1 kΩ÷1 MΩ	20; 30	0,25 0,125
f) potenţiometre multiple	150 kΩ÷500 kΩ	20; 30	0,1; 0,2; 0,25
g) potenţiometre bobinate glazurate	30 Ω÷4,3 kΩ	5; 10	15÷50
h) potenţiometre bobinate de panou	4,7 kΩ÷150 kΩ	5; 10	3; 4; 6; 15

1.9. REZISTOARE NELINIARE

Pentru rezistoarele fixe sau variabile studiate pînă acum, între tensiunea U care li se aplică şi curentul I care le străbate există o relaţie lineară (legea lui Ohm), v. fig. 1.31 *a*:

$$U=RI, \text{ sau } I=\frac{U}{R}.$$

Rezistoarele nelineare — termistoare, varistoare, fotorezistoare — folosesc proprietăţile materialelor semiconductoare pentru a realiza o dependenţă neliniară între tensiune şi curent.

Termistoarele sînt rezistoare a căror rezistenţă depinde puternic de temperatură; în funcţie de modul de variaţie al rezistivităţii se obţin termistoare cu coeficient de temperatură negativ — NTC (rezistenţa scade cu creşterea temperaturii) sau pozitiv — PTC (rezistenţa creşte cu temperatura), fig. 1.31 *b*. Pentru obţinerea termistoarelor NTC se folosesc oxizi şi elemente din grupa fierului: Fe, Cr, Mn, Ni; prin impurificare cu ioni străini aceste materiale se transformă în semiconductoare, în acest fel mărindu-se conductibilitatea şi variaţia cu temperatura a rezistivităţii. Materialele folosite pentru obţinerea termistoarelor cu coeficient de temperatură pozitiv sînt pe bază de titanat de bariu ($BaTiO_3$) sau soluţie solidă de titanat de bariu şi titanat

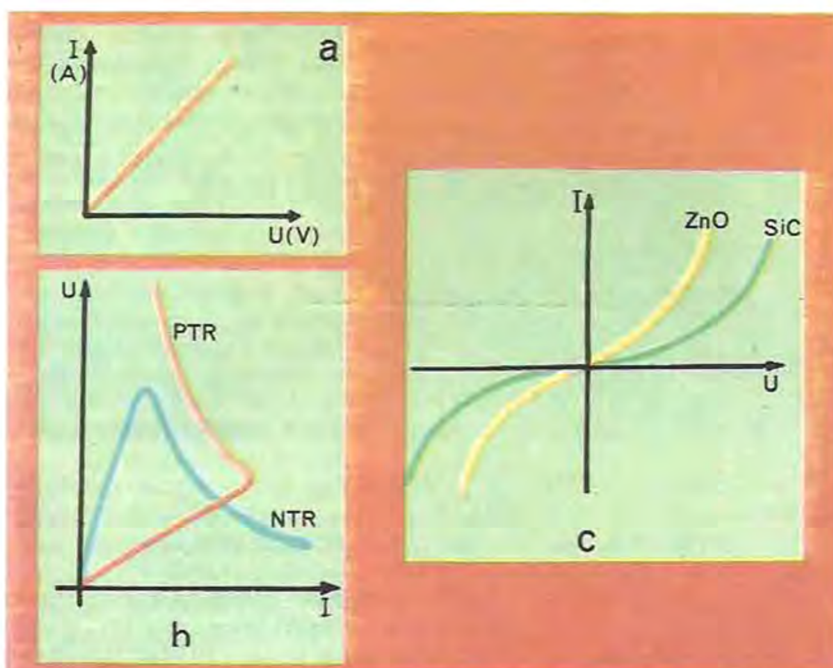


Fig. 1.31. Caracteristicile tensiune-curent pentru rezistoare: *a*) pentru rezistoare lineare; *b*) pentru termistoare; *c*) pentru varistoare.

de stronţiu; impurificate cu ioni tri-, tetra- sau pentavalenţi se obţin materiale semiconductoare de tip n.

Materialele semiconductoare astfel obţinute sînt amestecate cu un liant şi li se aplică o tehnologie asemănătoare materialelor ceramice; termistoarele se pot obţine sub formă de plachete, cilindri, discuri, filamente (protejate în tuburi de sticlă).

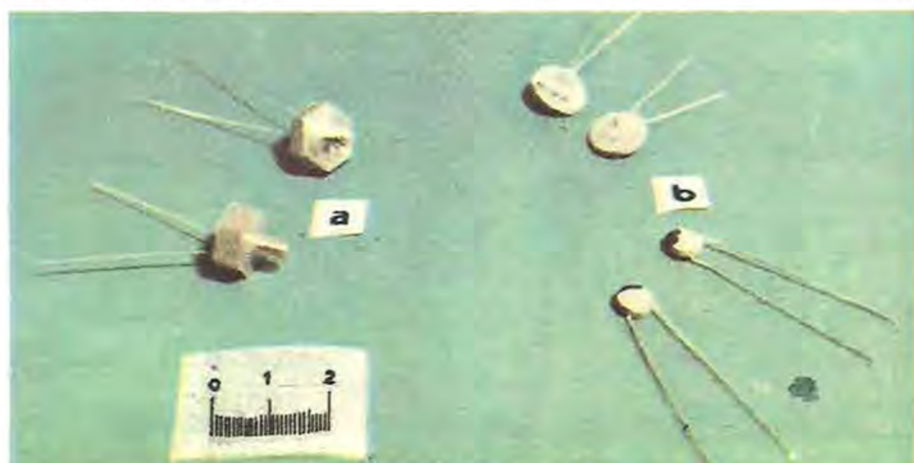


Fig. 1.32. Tipuri de termistoare: *a* — termistor disc capsulat; *b* — termistor disc protejat cu lac.

În fig. 1.32 sînt ilustrate două tipuri de termistoare NTC fabricate la I.P.E.E. — Curtea de Argeş:

a — termistor disc capsulat

b — termistor disc protejat cu lac

Termistoarele tip PTC nu se fabrică în ţară.

Legile de variaţie ale rezistenţei cu temperatura sînt exponenţiale; astfel: — pentru termistoarele tip NTC există relaţia

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}};$$

— pentru termistoare tip PTC:

$$R_T = A + Ce^{\frac{B}{T}},$$

unde A, B, C sînt constante de material iar T este temperatura în °K.

Principalele faze tehnologice de obţinere a termistoarelor NTC sînt date în fig. 1.33:

a — obţinerea discului termistorului prin presarea materialului (sub formă de pulbere amestecată cu liant), urmată de tratament termic,

b — metalizarea discului prin depunerea peliculei din argint pentru a permite lipirea terminalelor,

c — prin sudură se lipesc terminalele: urmează protejarea termistorului astfel obţinut cu un strat de lac şi marcarea.

Marcarea valorii rezistenţei nominale se face în clar sau în codul culorilor specificat în catalog (prin benzi colorate sau prin colorarea stratului de protecţie).

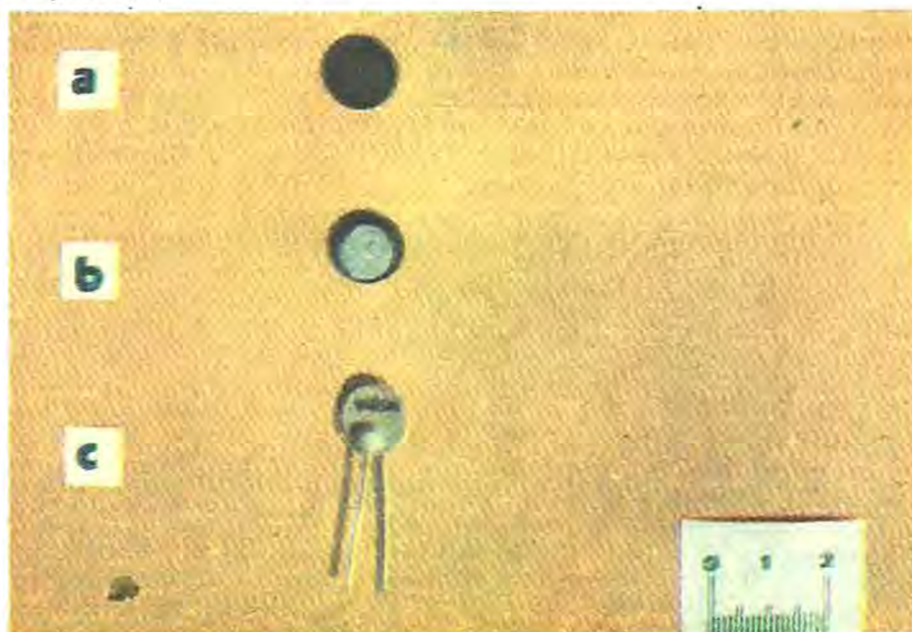


Fig. 1.33. Fazele tehnologice de fabricare a termistoarelor: *a* — disc obţinut prin presare; *b* — disc metalizat; *c* — disc cu terminalele lipite, protejat cu lac şi marcat.

Termistoarele cu coeficient de temperatură negativ sînt utilizate ca elemente neliniare pentru stabilizarea tensiunii sau curentului, pentru compensarea variației cu temperatura a altor elemente și ca traductor de temperatură.

O schemă simplă care demonstrează utilitatea termistorului în circuite care necesită tensiuni constante cu temperatura este ilustrată în fig. 1.34: se observă că tensiunea U rezultată ca suma tensiunilor U_1 și U_2 este constantă într-un domeniu al curentului I, respectiv într-un domeniu de temperatură.

Termistoarele PTC se folosesc ca traductoare de temperatură, stabilizatoare și limitatoare de curent, în aplicații ce realizează protecția la scurtcircuit sau supratensiuni.

Principalele caracteristici ale termistoarelor NTC fabricate în țară, sînt date în tabelul 1.6.

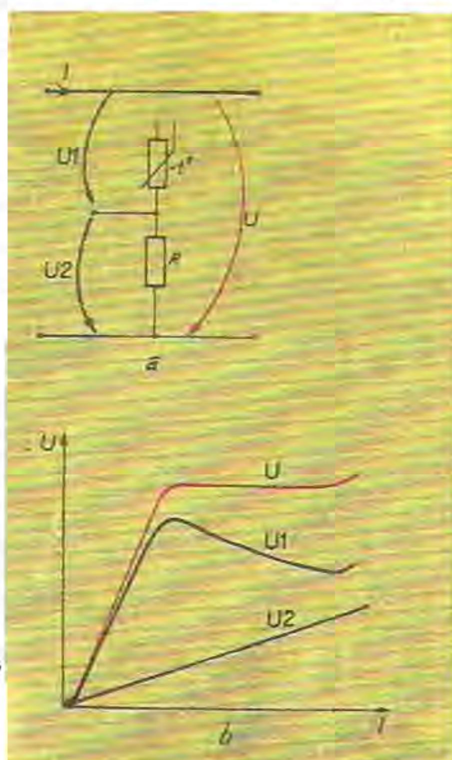


Fig. 1.34. Stabilizarea tensiunii cu ajutorul termistoarelor: *a*) schema de principiu; *b*) însumare grafică.

Tabelul 1.6

Tipurile și caracteristicile principale ale termistoarelor fabricate la I.P.E.E. — Curtea de Argeș

Caracteristici	Domeniu de variație
Tip	a) termistoare de uz general, disc neprotejat b) termistoare de uz general, disc protejat c) termistoare de uz general încapsulate
Seria	TG
Valoarea nominală	10 Ω÷680 Ω (valoarea rezistenței termistorului la t=25°C)
Toleranța	±20%
Puterea, P_{max}	0,5 W÷1 W
Coeficient de temperatură	[—3,3÷—4,1] %/°C

Varistoarele sînt rezistoare a căror rezistență este determinată de tensiunea aplicată la bornele lor. Materialele cele mai utilizate pentru obținerea varistoarelor sînt carbura de siliciu (SiC) și oxidul de zinc (ZnO); ca-

racteristica curent-tensiune pentru varistoare este ilustrată în fig. 1.31 *c*.

Fazele tehnologice ale fabricării varistoarelor sînt ilustrate în figura 1.35: materialul de bază (carbura de siliciu) sub formă de pulbere, amestecat cu un liant, este supus presării, sinterizării şi unui proces de îmbătrînire care constă în supunerea baghetei sau discurilor formate unui regim electric în impulsuri ce depăşeşte tensiunea nominală de lucru; acest proces este esenţial în formarea proprietăţilor conductoare specifice varistoarelor.

Bagheta de carbură de siliciu astfel obţinută fig. 1.35 *a*, este metalizată la capete, fig. 1.35 *b*, pentru a permite conectarea terminalelor şi tratată termic; urmează lipirea terminalelor, vopsirea şi marcarea varistorului (în clar), fig. 1.35 *c*.

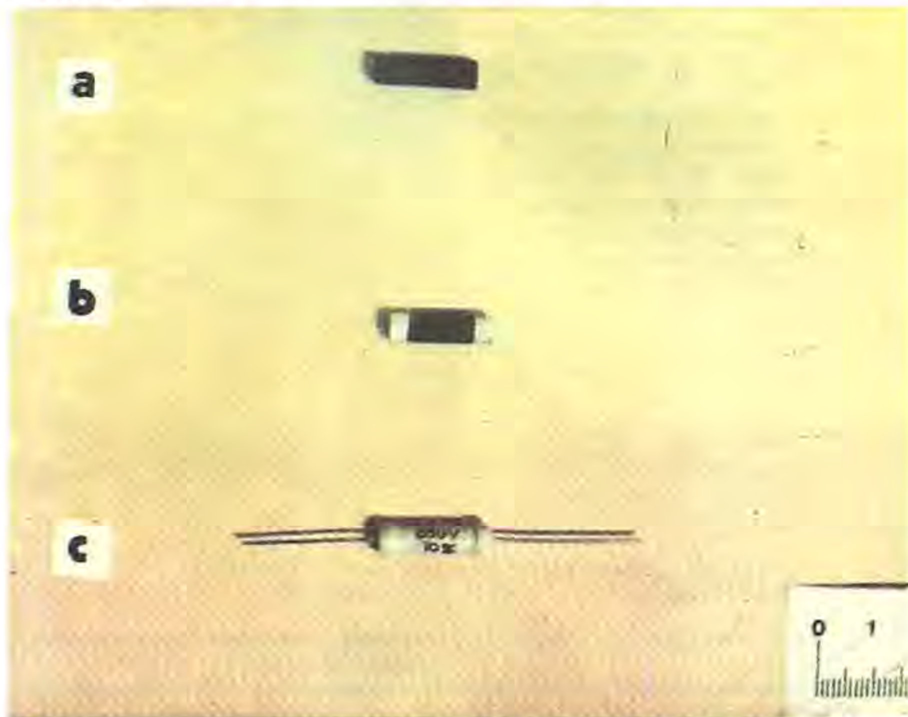


Fig. 1.35. Fazele tehnologice de fabricare ale varistoarelor: *a* — baghetă de carbură de siliciu; *b* — baghetă metalizată la capete; *c* — produs finit.

Relaţia curent-tensiune a unui varistor este de forma:

$$I=K_1U+K_2U^n$$

unde K_1 şi K_2 sînt constante, $n>1$. Relaţia de mai sus se poate aproxima de relaţiile:

$$I=KU^{\alpha} \qquad \text{sau} \qquad U=CI^{\beta},$$

unde K este o constantă ce fixează tensiunea de lucru a varistorului şi depinde de forma, dimensiunile varistorului şi de tehnologia de fabricaţie; α şi β sînt coeficienţi de neliniaritate ($\alpha=5$ pentru SiC; $\alpha\approx25$ pentru ZnO).

Dacă tensiunii aplicate i se inversează polaritatea, curentul își schimbă sensul; se definește A — asimetria curenților — ca fiind mărimea ce caracterizează diferența dintre curenții care străbat varistorul la schimbarea polarității tensiunii aplicate.

Varistoarele sînt utilizate pentru protecția contactelor de rupere, împotriva supratensiunilor pentru protecția diferitelor componente sau circuite electronice, sînt folosite pentru stabilizarea tensiunii și curentului, în circuite analogice și de impulsuri, în circuite care lucrează în modulație de amplitudine și frecvență etc.

Utilizarea varistoarelor ca stabilizatoare de tensiune este ilustrată în fig. 1.36: cu cît neliniaritatea caracteristicii curent-tensiune a varistorului este mai pronunțată, cu atît variația tensiunii de ieșire ΔU_2 este mai mică (stabilizare mai bună) atît la variațiile tensiunii de alimentare ΔU_1 (figura 1.36 *a*) cît și la variațiile sarcinii (fig. 1.36 *b*).

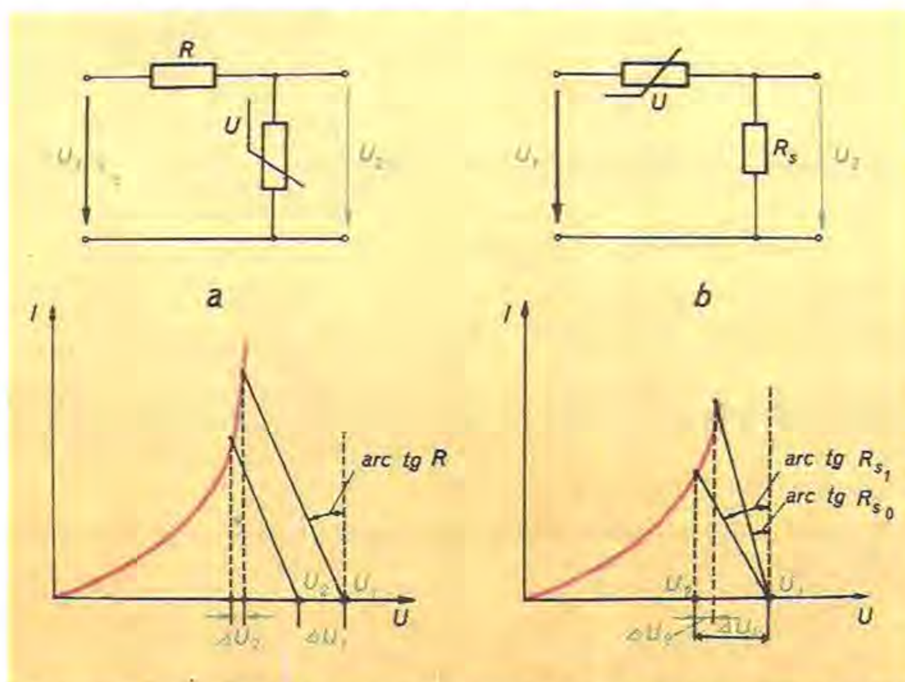


Fig. 1.36. Utilizarea varistoarelor ca stabilizatoare de tensiune: *a*) stabilizare la variația tensiunii de alimentare; *b*) stabilizare la variația sarcinii.

Varistoarele fabricate la I.P.E.E. — Curtea de Argeș sînt:
— de joasă tensiune, de uz general, seria VG
— de joasă tensiune pentru protecția contactelor, seria VP
— de înaltă tensiune, seria VT.
Caracteristicile principale ale acestor varistoare sînt date în tabelul 1.7.

Fotorezistoarele sînt rezistențe dependente de fluxul luminos și au la bază efectul fotoelectric intern în semiconductoare.

Principalele caracteristici ale fotorezistoarelor sînt:

— rezistența la întuneric, R_a care reprézintă valoarea rezistenței la iluminarea nulă

— sensibilitate la fluxul luminos.

Fotorezistoarele au fost realizate inițial pe bază de seleniu cristalin; o largă răspîndire o au, la ora actuală, fotorezistoarele din PbS și CdS; nu se fabrică în țară.

Tabelul 1.7

Caracteristicile principale ale varistoarelor fabricate la I.P.E.E. — Curtea de Argeș

Tipul varistorului	Caracteristici
1) varistoare disc, neprotejate fără terminale; 2) varistoare disc, protejate prin lăcuire	— tensiunea nominală 48 V — tensiunea repetitivă maximă 145 V — asimetria curenților *A*: max. 10% — coeficient de temperatură α_r: max. 0,8%/°C — puterea disipată nominală: $P=0{,}4$ W
3) varistoare cilindrice de înaltă tensiune	— tensiunea nominală: 680÷1350 V — toleranța U_{nom}: ±10; ±20% — curent nominal: $I_n \leqslant 10$ mA — coeficient de neliniaritate ⩾4 — puterea disipată nominală: $P_n=0{,}8$ W
4) varistoare disc de uz general	— tensiunea nominală $U_n=27$ V — curent nominal $I_n=3$ mA — toleranța tensiunii nominale ±20% — puterea nominală $P_n=0{,}8$ W — asimetria curenților *A*: ⩽10% — coeficient de neliniaritate ⩾3 — coeficient de temperatură $\alpha_r \leqslant 0{,}8$%/°C

Capitolul 2

CONDENSATOARE

2.1. CAPACITATEA UNUI CONDENSATOR; CLASIFICAREA CONDENSATOARELOR

Condensatorul este o componentă pasivă care, alături de rezistor, este utilizată frecvent în circuitele electronice [5], [6], [29].

Dacă unui condensator i se aplică o tensiune continuă U, acesta se va încărca cu o sarcină Q, raportul dintre sarcina Q şi tensiunea U fiind o mărime constantă şi caracteristică pentru condensatorul considerat; acest raport se numeşte capacitatea condensatorului

$$C=\frac{Q}{U}$$

În regim armonic, condensatorul este componenta pentru care, dacă i se aplică o tensiune variabilă în timp u_c, între tensiunea aplicată şi curentul i care străbate condensatorul există relaţia:

$$u_c=\frac{1}{C}\int i\,dt,$$

C fiind *capacitatea* condensatorului. Condensatorul de capacitate C introduce în circuit o reactanţă capacitivă măsurată în Ω, $X_c=\frac{1}{\omega C}$, iar defazajul între tensiune şi curent este de 90°, tensiunea fiind defazată în urma curentului (figura 2.1). Unitatea de măsură pentru capacitate este faradul, simbol F; se folosesc frecvent submultiplii săi:

$$1\ \mu F=10^{-6}\ F;\ 1\ nF=10^{-9}\ F;\ 1\ pF=10^{-12}\ F$$

Constructiv, condensatorul este alcătuit din două suprafeţe metalice numite armături între care se află un mediu dielectric de permitivitate ε (constanta dielectrică de material). Pentru un condensator *plan*, capacitatea C este dată de relaţia:

$$C=\frac{\varepsilon S}{d}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{d}$$

unde: ε_0 = permitivitatea dielectrică absolută a vidului

ε = permitivitatea absolută a dielectricului condensatorului

$\varepsilon_r=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ = permitivitatea relativă a dielectricului

S = suprafaţa armăturilor plane

d = distanţa dintre armături

Pentru un condensator *cilindric*, valoarea capacităţii se determină cu ajutorul relaţiei:

$$C=\frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{b}{a}}=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

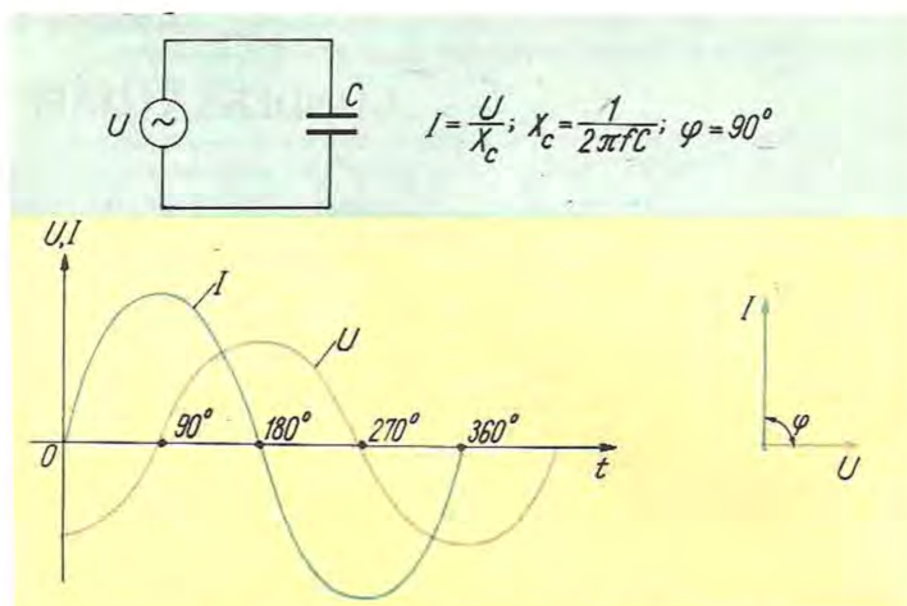


Fig. 2.1. Relaţia tensiune-curent pentru un condensator de capacitate C.

unde ε_0, ε_r, ε, au semnificaţiile de mai sus,

l = lungimea cilindrului
a = raza cilindrului interior
b = raza cilindrului exterior

Principial, cele două tipuri de condensatoare sînt ilustrate în fig. 2.2.

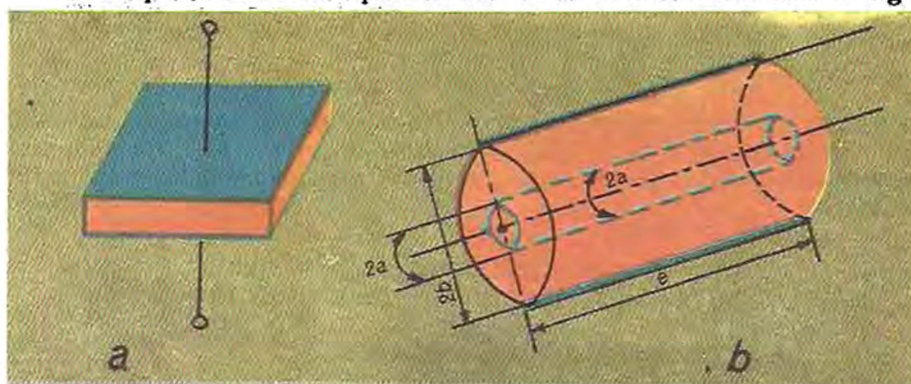


Fig. 2.2. Construcţia principială a condensatorului: a) condensator plan; b) condensator cilindric.

Din relaţiile date se observă importanţa permitivităţii dielectricului în obţinerea unor condensatori de capacitatea dorită; un condensator cu capacitatea $C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$, deci cu armăturile plane plasate în vid, va avea o capaci-

tate de ε_r mai mare decît C_0 dacă între armături se va plasa un dielectric caracterizat prin permitivitatea absolută ε (sau prin cea relativă, $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$)

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_r C_0$$

În cîmpuri electrice puternice, materialul dielectric își pierde proprietățile izolante (datorită unor fenomene interne specifice crește curentul de conducție în dielectric); fenomenul se numește străpungerea dielectricului. Valoarea intensității cîmpului electric la care se produce acest fenomen se numește rigiditate dielectrică și se măsoară în kV/mm.

Proprietățile unor dielectrici uzuali sînt date în tabelul 2.1.

Proprietățile unor dielectrici uzuali *Tabelul 2.1*

Materialul dielectric	Permitivitatea relativă	Rigiditatea dielectrică kV/mm
vid	1,00000	
aer	1,00054	0,8
apă	78	—
hîrtie	3,5	14
mică roșie	5,4	160
porțelan	6	4
sticlă de cuarț	3,8	8
bachelită	4,8	12
polietilenă	2,3	50
poliester	2,6	25
teflon	2,1	60

Condensatoarele se pot clasifica după mai multe criterii: după natura dielectricului, din punct de vedere constructiv, al domeniului de frecvență, după domeniul de utilizare.

Din punct de vedere constructiv există:

a) condensatoare fixe, care-și mențin constantă valoarea capacității nominale în tot timpul funcționării;

b) condensatoare reglabile și

c) condensatoare variabile (figura 2.3).

Condensatoarele reglabile (denumite și „semivariabile", „ajustabile" sau „trimere") se caracterizează prin faptul că valoarea capacității lor poate fi reglată (de regulă ocazional, la punerea în funcție sau la verificări periodice), în limite reduse.

Condensatoarele variabile sînt condensatoare a căror capacitate poate și trebuie să fie modificată frecvent între anumite limite relativ largi impuse de funcționarea circuitelor electronice (de exemplu condensatoare de acord pentru radioreceptoare).

În funcție de natura dielectricului, condensatoarele pot fi (fig. 2.3):

— cu dielectric gazos (aer, vid, gaze electronegative),

— cu dielectric lichid (ulei),

— cu dielectric solid organic și anorganic,

— cu dielectric peliculă de oxizi metalici.

În categoria condensatoarelor cu dielectric gazos intră condensatoarele reglabile și variabile cu aer; cînd condensatoarele variabile sînt destinate funcționării în regim de tensiuni ridicate (de ordinul kilovolților), se folosesc ca dielectrici gaze electronegative sau incinte vidate.

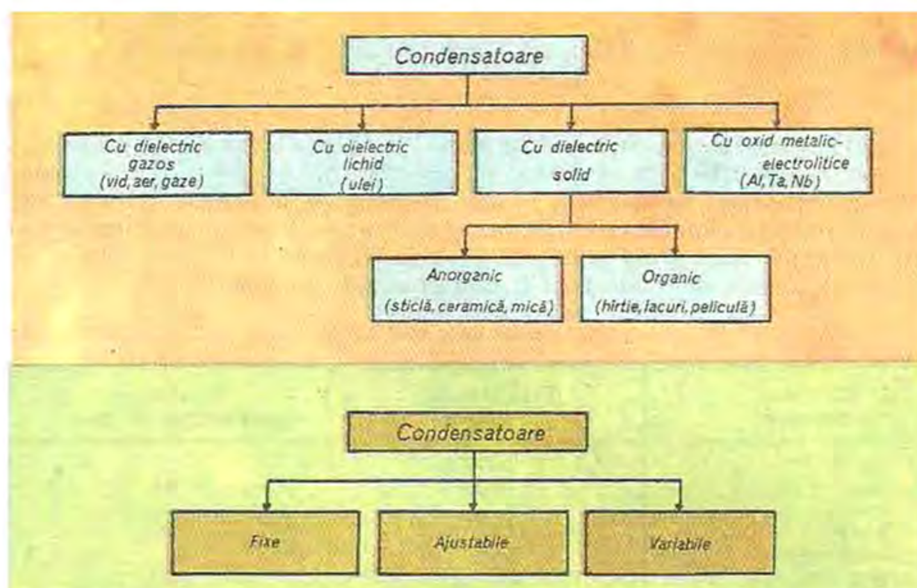


Fig. 2.3. Clasificarea condensatoarelor.

Condensatoarele cu dielectric lichid (ulei mineral sau ulei de transformator) sînt mai rar fabricate şi folosite la ora actuală.

Condensatoarele cu dielectric solid anorganic au ca material dielectric sticla, mica şi materialele ceramice. Pentru condensatoare cu dielectric solid organic se folosesc hîrtia. pelicule sintetice nepolare (polistirenul, teflonul politetrafluoretilena, polipropilena) şi pelicule sintetice polare (polietilentereftalat, policarbonat, răşină poliamidică).

O categorie aparte o constituie condensatoarele electrolitice care au dielectricul format dintr-o peliculă de oxid (Al_2O_3, Ta_2O_5, TiO_2); cei mai utilizaţi sînt oxizii de aluminiu şi tantal. Cîteva dintre tipurile de condensatoare sînt ilustrate în fig. 2.4.

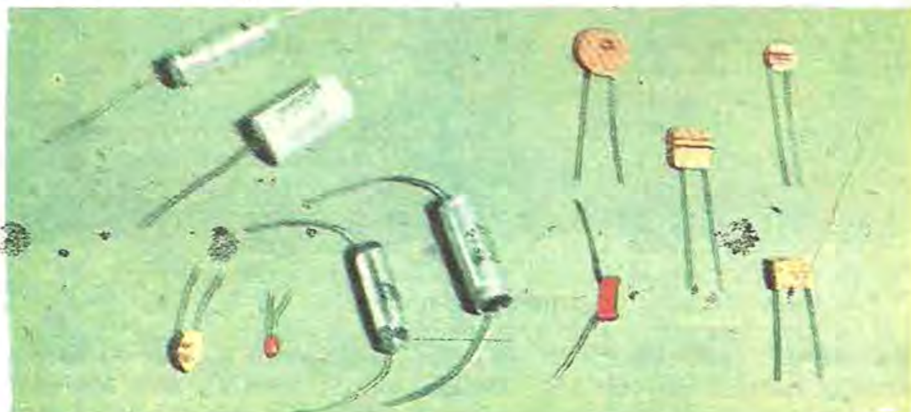


Fig. 2.4. Diferite tipuri de condensatoare.

2.2. PARAMETRII CONDENSATOARELOR

Principalii parametri electrici ai condensatoarelor sînt:

— capacitatea nominală, C_n [F]: reprezintă valoarea capacității condensatorului care trebuie realizată prin procesul tehnologic și care este înscrisă pe corpul acestuia. Condițiile de temperatură și frecvență la care se măsoară capacitățile nominale sînt precizate de obicei în catalogul fabricii producătoare.

— toleranța, t, [%] reprezintă abaterea maximă a valorii reale a capacității față de valoarea ei nominală. Pentru condensatoare cu $C_n \leqslant 1$ μF capacitatea nominală respectă valorile normalizate din seriile E—6, E—12, E—24, E—48, cu toleranțele corespunzătoare acestor serii (v. fig. 1.3). Pentru $C_n > 1$ μF, valorile nominale și toleranțele depind de firma producătoare. Pentru condensatoarele electrolitice se dau de obicei toleranțe nesimetrice: (0%, +50%), (0%, +80%), (—10%, +30%), (—10%, +50%), (—10%, +100%), (—20%, +80%).

— tensiunea nominală, U_n [V], este tensiunea continuă maximă sau tensiunea alternativă eficace maximă care poate fi aplicată continuu la terminalele condensatorului, în gama temperaturilor de lucru. Valorile tensiunii nominale nu sînt normalizate; uzuale sînt următoarele valori: 6, 12, 16, 25, 63, 70, 100, 125, 250, 350, 450, 500, 650, 1 000 V.

— rezistența de izolație, R_{iz} [Ω], este definită ca raportul dintre tensiunea continuă aplicată unui condensator și curentul care-l străbate, la 1 minut după aplicarea tensiunii; în funcție de tipul condensatorului (deci de natura dielectricului), rezistența de izolație poate varia între 100 MΩ și 100 GΩ. Condițiile în care se efectuează măsurătorile (tensiune, temperatură, umiditate) sînt specificate în catalog. Pentru condensatoarele cu $C_n > 0{,}1$ μF se indică în locul rezistenței de izolație, constanta de timp $\tau = R_{iz}C_n$ (care depinde de proprietățile electrice ale dielectricului). Pentru condensatoarele electrolitice parametrul care interesează este curentul de fugă, I_f, care reprezintă curentul ce trece prin condensator cînd acestuia i se aplică o tensiune continuă la terminale, curent măsurat după un timp t (1 min, 5 min) de la aplicarea tensiunii continue.

— tangenta unghiului de pierderi, tg δ [—]. Într-un condensator, din cauza pierderilor în dielectric și în rezistența nenulă a armăturilor și terminalelor se disipă putere activă. Tangenta unghiului de pierderi, tg δ, se definește ca raportul dintre puterea activă, P_a, care se disipă pe condensator și puterea reactivă, P_r, a acestuia (măsurate la frecvența la care se măsoară și capacitatea nominală). Un condensator este cu atît mai bun cu cît puterea activă disipată în el este mai mică.

Dacă considerăm o schemă echivalentă în care pierderile în condensator sînt reprezentate fie prin rezistența r (în schema echivalentă serie), fie prin rezistența R (în schema echivalentă paralel), v. fig. 2.5, construind diagrama fazorială tensiune—curent se observă că unghiul de defazaj φ dintre tensiunea aplicată și curentul care parcurge condensatorul este mai mic decît 90° (φ=90° în cazul condensatorului ideal, fără pierderi). Complementul unghiului de defazaj este unghiul δ — unghiul de pierderi. Tangenta unghiului de pierderi, pentru cele două scheme echivalente este dată de relațiile:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} \quad \text{și} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C},$$

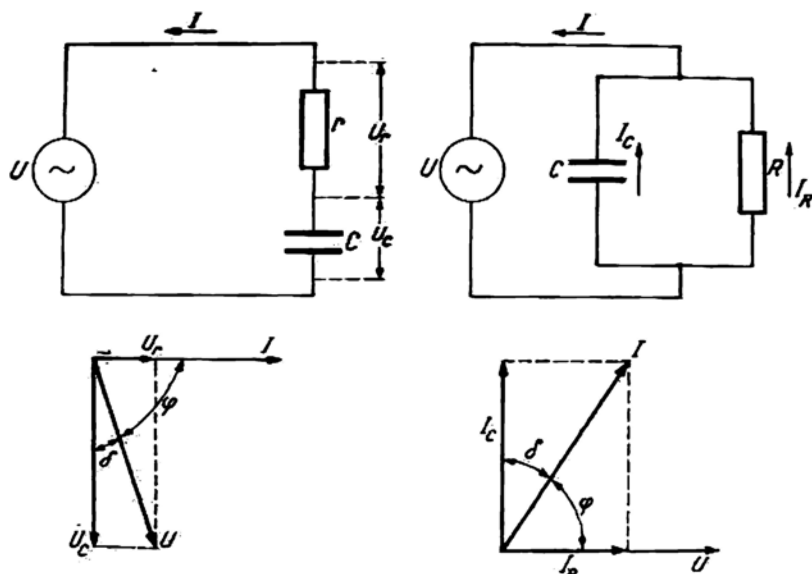


Fig. 2.5. Definirea tangentei unghiului de pierderi.

sau poate fi pusă sub forma raportului dintre puterea activă şi puterea reactivă a condensatorului.

Mărimea tangentei unghiului de pierderi depinde de natura dielectricului şi de procesul tehnologic al condensatorului considerat; este de dorit ca această mărime să fie cît mai mică. În tabelul 2.2 sînt date valorile tipice ale tg δ pentru cîteva tipuri de condensatoare.

— rigiditatea dielectrică reprezintă tensiunea maximă continuă pe care trebuie să o suporte condensatorul un timp minim (de obicei 1 minut) fără să apară străpungeri sau conturnări.

— intervalul temperaturilor de lucru (T_{min}—T_{max}) reprezintă limitele de temperatură între care condensatorul funcţionează timp îndelungat. Natura dielectricului determină acest interval care poate fi:
— (—10°C; +70°C) pentru condensatoarele cu polistiren şi cu hîrtie cerată;
— (—40°C; +85°C) pentru condensatoarele cu mylar, ceramice, cu hîrtie uleiată;
— (—25°C; +70°C) pentru condensatoare electrolitice,
— (—40°C; +125°C) pentru condensatoarele electrolitice şi cele cu tantal.

— coeficientul de variaţie a capacităţii cu temperatura, este definit de relaţia:

$$\alpha_C = \frac{1}{C}\frac{dC}{dT}\,[1/°C]$$

În cazul unei variaţii lineare, expresia lui devine: $\alpha_C = \frac{1}{C_0}\frac{C-C_0}{T-T_0}\,[1/°C]$

Valorile tg δ pentru cîteva tipuri de condensatoare

Tipul condensatorului	tgδ	Condiții de măsură
ceramic și multistrat tip I	$10 \cdot 10^{-4}$	$C_n = 1$ nF, $f = 1$ MHz
ceramic și multistrat tip II	$35 \cdot 10^{-4}$	
cu polistiren (stiroflex)	$5 \cdot 10^{-4}$	$C_n = 1$ nF; $f = 1$ KHz
cu polietilentereftalat (mylar)	$10 \cdot 10^{-3}$	
cu hîrtie	10^{-2}	$f = 1$ KHz
electrolitic miniatură	0,25	$f = 100$ Hz
electrolitic cu tantal	0,08	$f = 50$ Hz

unde C_0 este valoarea capacității la temperatura T_0
C este valoarea capacității la temperatura T.

Coeficientul de temperatură este exprimat tot mai frecvent în „ppm/°C" — părți pe milion pe grad Celsius — definit astfel:

$$\alpha_C = \frac{C - C_0}{C_0(T - T_0)} 10^6 [\text{ppm/°C}],$$

unde C, C_0, T și T_0 au aceleași semnificații ca în relația de mai sus.

— coeficientul de variație al capacității sub acțiunea unor anumiți factori (cum ar fi: umiditatea, tensiunea aplicată, durată de păstrare etc.), K_p, este dat de relația:

$$K_p = \frac{C_2 - C_1}{C_1} 100 \ [\%]$$

unde C_1 reprezintă valoarea condensatorului în condiții normale de funcționare iar C_2 = valoarea la care ajunge capacitatea condensatorului sub acțiunea factorului p.

2.3. SIMBOLIZAREA ȘI MARCAREA CONDENSATOARELOR

Reprezentarea convențională a condensatoarelor se face conform STAS 11381/7-80 și este ilustrată în figura 2.6, unde:

a — condensator (în general)
b — condensator (în general), simbol tolerat
c — condensator de trecere
d — condensator de trecere, simbol tolerat
e — condensator de trecere, simbol nestandardizat
f — condensator electrolitic
g — condensator electrolitic, simbol tolerat
h — condensator electrolitic, simbol nestandardizat

Fig. 2.6. Reprezentarea convențională a condensatoarelor.

i — condensator variabil
j — condensator variabil, simbol tolerat
k — condensator semireglabil, semiajustabil, trimer
l — condensator semireglabil, semiajustabil, trimer, simbol tolerat.

Condensatoarele sînt marcate în clar sau codificat, prin culori (inele, benzi sau puncte), prin simboluri alfanumerice, sau cod literal, normalizate internațional sau, uneori, specifice unui anumit producător. Indiferent de sistemul de marcare adoptat, caracteristicile ce se înscriu pe corpul condensatorului sînt:

a) în mod obligatoriu, pe orice tip de condensator:

— capacitatea nominală C_n, cu unitatea de măsură (în clar, cod de culori sau literal);

— toleranța valorii nominale: în clar (în % sau în pF dacă $C_n \leqslant 10$ pF), în cod de culori sau literal;

b) în mod obligatoriu, pe unele tipuri de condensatoare:

— polaritatea bornelor (numai la condensatoarele electrolitice), în clar;

— terminalul conectat la armătura exterioară (numai la condensatoarele electrolitice sau cu hîrtie), în clar;

— tensiunea nominală U_n (la condensatoarele electrolitice, cu hîrtie, cu film plastic) în clar, cod literal sau de culori;

— coeficient de temperatură al capacității (la condensatoarele ceramice) în cod de culori sau literal;

c) în mod facultativ, în funcție de producător se poate marca: firma, data fabricației (an, lună), codul condensatorului (specific firmei), frecvența de lucru etc.

Marcarea în codul culorilor. este aplicată mai ales condensatoarelor ceramice. Citirea indicațiilor colorate pentru condensatoarele ceramice tip „disc" sau „plachetă" se face începînd de la terminale; pentru condensatoarele ceramice tip „tubular" citirea se face de la inelul sau banda mai groasă sau mai apropiată de extremitatea corpului condensatorului. Codul culorilor este dat în tabelul 2.3, iar ordinea de citire a culorilor și semnificația lor în figura 2.7 (pentru condensatoare ceramice) și figura 2.8 (pentru condensatoare cu tantal și cu stiroflex).

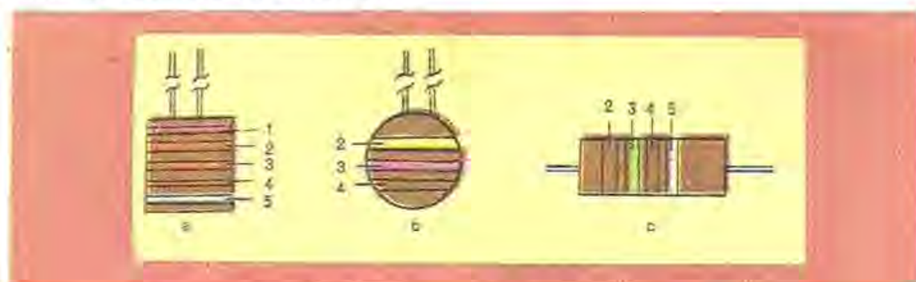


Fig. 2.7. Marcarea în codul culorilor pentru condensatoare ceramice: *a, c*) marcarea completă; *b*) marcarea numai a valorii nominale: *1* — coeficient de variație cu temperatura, *2* — prima cifră semnificativă, *3* — a doua cifră semnificativă, *4* — coeficient de multiplicare, *5* — toleranța.

Tabelul 2.3.

Codul culorilor pentru marcarea condensatoarelor

Culoarea	Cifra semnificativă	Factor de multiplicare		Toleranțe		Coeficient de temp. [ppm/°C]	Tensiunea nominală	
		condens. ceramice	condens. cu hîrtie	[pF] $C<10$ pF	[%] $C>10$ pF		condens. tantal	condens stiroflex
negru	0	1	1	±2	± 20	0	10	630
maro	1	10	10	±0,1	± 1	— 33	1,6	
roșu	2	10^2	10^2	±0,25	± 2	— 75	4	160
portocaliu	3	10^3	10^3	—	± 2,5	— 150	40	—
galben	4	10^4	10^4	—	±100	— 220	6,3	63
verde	5	10^5	—	±0,5	± 5	— 330	16	250
albastru	6	—	—	—	—	— 470	—	25
violet	7	—	—	—	—	— 750	—	—
gri	8	10^{-2}	—	—	— 20 + 30	—2 200	25	—
alb	9	10^{-1}	—	±1	± 10	+ 120	2,5	—
auriu			10^{-1}	—		+ 100		—
argintiu								

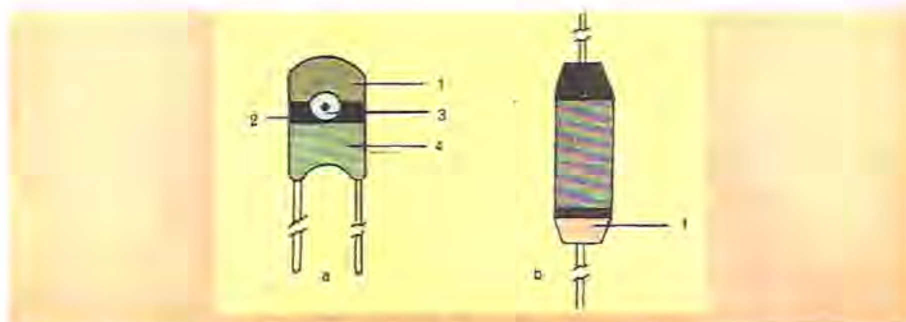


Fig. 2.8. *a*) Marcarea în codul culorilor a condensatoarelor electrolitice cu tantal: *1* — prima cifră semnificativă, *2* — a doua cifră semnificativă, *3* — factor de multiplicare, *4* — tensiunea nominală; *b*) marcarea în cod a tensiunii nominale la condensatoarele cu stiroflex: *1* — tensiunea nominală.

2.4. CONDENSATOARE FIXE

2.4.1. CONDENSATOARELE CERAMICE

Condensatoarele ceramice folosesc ca dielectric o ceramică formată dintr-un amestec de oxizi, silicaţi, titanaţi şi zirconaţi ai diferitelor metale, caolin, talc etc. În funcţie de compoziţie, ceramica dielectrică obţinută poate fi:

a) ceramica de tip *I*, care are la bază titanaţi de magneziu şi calciu cu permitivitatea $\varepsilon_r = 5 \div 200$. Condensatoarele realizate cu acest tip de dielectric au o variaţie liniară finită a capacităţii cu temperatura şi tg δ mic.

b) ceramica de tip *II* pe bază de zirconaţi şi titanaţi de bariu sau stronţiu, are permitivitatea foarte mare, ajungînd pînă la 15 000, dar coeficientul de variaţie al capacităţii cu temperatura este nedefinit şi tg δ mai mare (cu cel puţin un ordin de mărime faţă de ceramica de tip *I*).

c) ceramica de tip *III* are la bază compoziţii ale titanatului de bariu care pot fi transformate în semiconductor prin tratare termică, după care prin oxidare se poate reface stratul dielectric la suprafaţa materialului pe o adîncime foarte mică; permitivitatea obţinută este foarte mare (100 000, 200 000). Condensatoarele ceramice tip *III* nu se fabrică în ţară.

Din punct de vedere constructiv, condensatoarele ceramice pot fi *tubulare, plachetă* sau *disc*. Procesul tehnologic de obţinere a acestora cuprinde următoarele principale etape:

— ceramica dielectrică este obţinută prin procesul tehnologic propriu materialelor ceramice: substanţele constituente sînt dozate, amestecate, măcinate; pulberea obţinută în amestec cu lianţi specifici, prin presare, laminare sau turnare, urmată de tratament termic, capătă forma de disc, plachetă sau tub ceramic de dimensiuni diferite (determinate de valoarea nominală a capacităţii şi de tensiunea nominală).

— armăturile din argint sînt depuse pe cele două părţi ale discului sau plachetei, sau în interiorul şi exteriorul tubului prin serigrafiere (pentru dis-

curi), depunere manuală (pentru plachete) sau cu ajutorul unei maşini automate (pentru tuburi); fixarea peliculei de argint pe suportul ceramic se face prin tratament termic

— lipirea terminalelor se face automat

— protejarea condensatorului astfel format se realizează prin acoperirea cu un strat de răşină termodură (pentru discuri şi plachete) sau de vopsea protectoare (pentru tuburi); urmează marcarea în clar sau în codul culorilor.

În fig. 2.9 sînt ilustrate cele trei tipuri constructive de condensatoare,

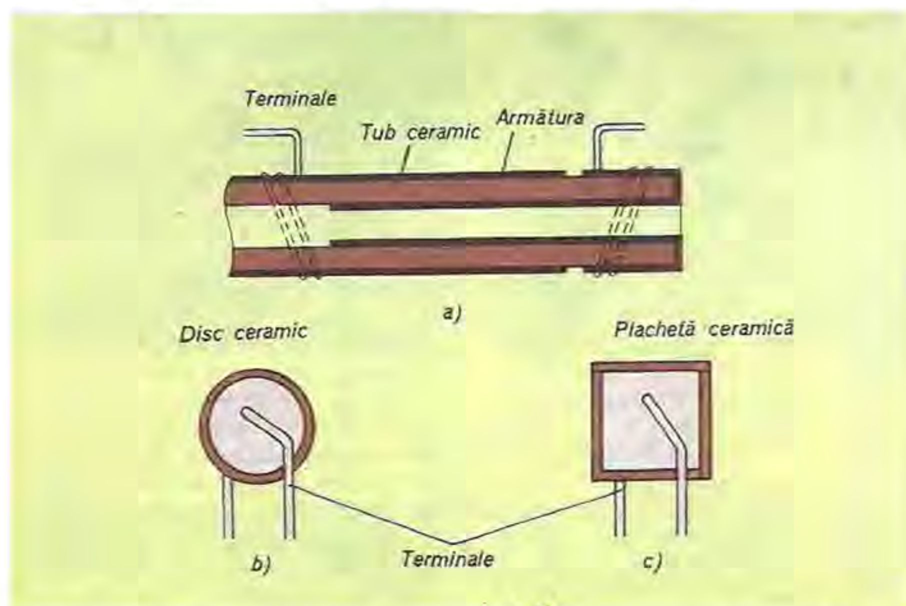


Fig. 2.9. Condensatoare ceramice: *a*) secţiune prin condensatorul ceramic tubular; *b*) condensatorul ceramic disc neprotejat; *c*) condensatorul ceramic plachetă neprotejat.

iar în fig. 2.10 sînt prezentate produsele finite: condensatoare ceramice de diferite valori nominale, marcate în clar şi în cod.

Condensatoarele ceramice multistrat sînt caracterizate printr-o mare capacitate specifică (capacitatea pe unitatea de volum); avînd dimensiuni mici şi valori nominale în limite largi (de la 3,3 pF—1 μF) tind să înlocuiască celelalte tipuri de condensatoare folosite în circuitele electronice.

Materialul dielectric este o pastă ceramică de tip *I* sau *II* care, prin laminare pe suport, permite obţinerea unor folii ceramice foarte subţiri de dimensiuni relativ mari faţă de dimensiunile unui condensator multistrat finit şi care va contribui la formarea a *n* componente identice. Pe această folie se depune prin serigrafie o configuraţie de *n* pelicule de argint-paladiu care constituie armătura stîngă a condensatoarelor; pe o altă folie, se depune o configuraţie similară care constituie armătura dreaptă a condensatoarelor ş.a.m.d. După suprapunerea acestor folii în număr diferit de straturi (în funcţie de valoarea nominală a capacităţii care trebuie realizată) şi pre-

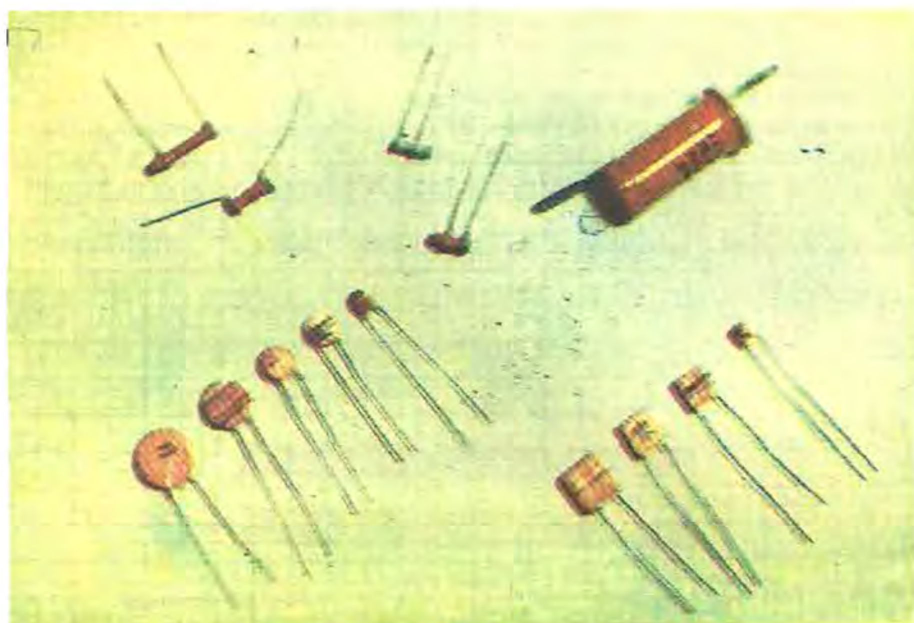


Fig. 2.10. Condensatoare ceramice.

sarea lor, urmează decuparea „cip"-urilor condensatoarelor şi fixarea proprietăţilor lor prin tratament termic. Prin metalizarea la extremităţile cipului se asigură o structură de condensatoare legate în paralel — structură pieptene. Sub această formă de „cip" neprotejat (figura 2.11 *a*), condensatorul este folosit în tehnologia straturilor groase (componentă pentru circuitele hibride).

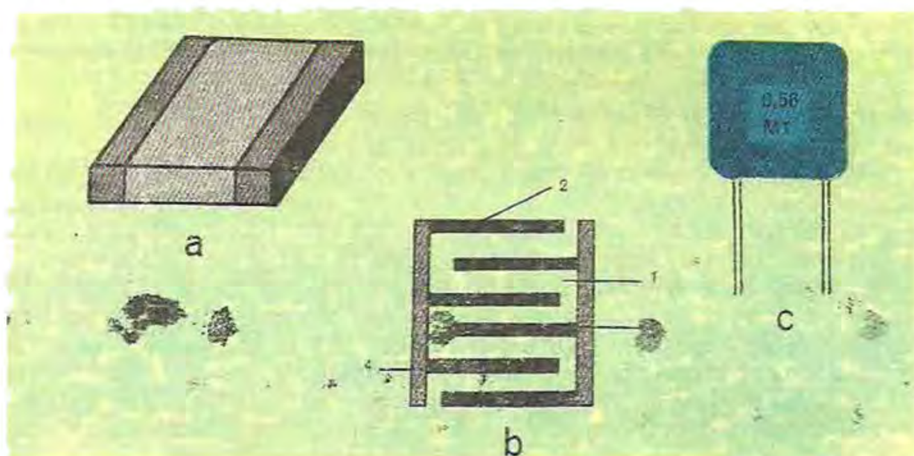


Fig. 2.11. Condensator ceramic multistrat: *a*) Condensator ceramic multistrat neîncapsulat; *b*) structură: *1* — dielectric, *2* — armătura stîngă, *3* — armătura dreaptă, *4*— metalizare; *c*) condensator ceramic multistrat protejat.

Zona metalizată, figura 2.11 *b*, care scurtcircuitează armăturile „stînga" şi respectiv „dreapta" serveşte şi pentru sudarea prin lipire a terminalelor din sîrmă de cupru dublu cositorită. Condensatorul este protejat prin acoperire cu un strat de răşină epoxidică; componenta în stare finită este ilustrată în figura 2.11 *c*.

Marcarea acestui tip de condensator se face astfel:

— capacitatea nominală se marchează în clar;

— toleranţa capacităţii în cod literal:
F—1%; G—2%; J—5%; K—10%; M—20%;

— tensiunea nominală în cod de cifre:
1—25 V_{cc}; 2—50 V_{cc}; 3—100 V_{cc}; 4—200 V_{cc}

Astfel, condensatorul marcat $\left(\begin{smallmatrix}0{,}56\\ M\,1\end{smallmatrix}\right)$ are valoarea nominală C_n=560 nF, $t=\pm 20\%$, U_n=25 V.

Performanţele condensatoarelor ceramice fabricate la I.P.E.E. Curtea de Argeş sînt ilustrate în tabelul 2.4.

2.4.2. CONDENSATOARE CU HÎRTIE

a) Condensatoarele *cu hîrtie* se realizează prin bobinarea a două folii de aluminiu care alcătuiesc armăturile, separate de două sau mai multe folii de hîrtie impregnate care constituie dielectricul. Schematic, bobinarea condensatorului este redată în figura 2.12 *a*. Armăturile cu dimensiuni cuprinse între 5şi15 μm se pot plasa suprapuse — bobinarea inductivă (efectul inductiv parazit la acest tip de bobinare este supărător la frecvenţă mai înaltă), sau decalate — bobinare neinductivă (bobina astfel realizată se scurtcircui-

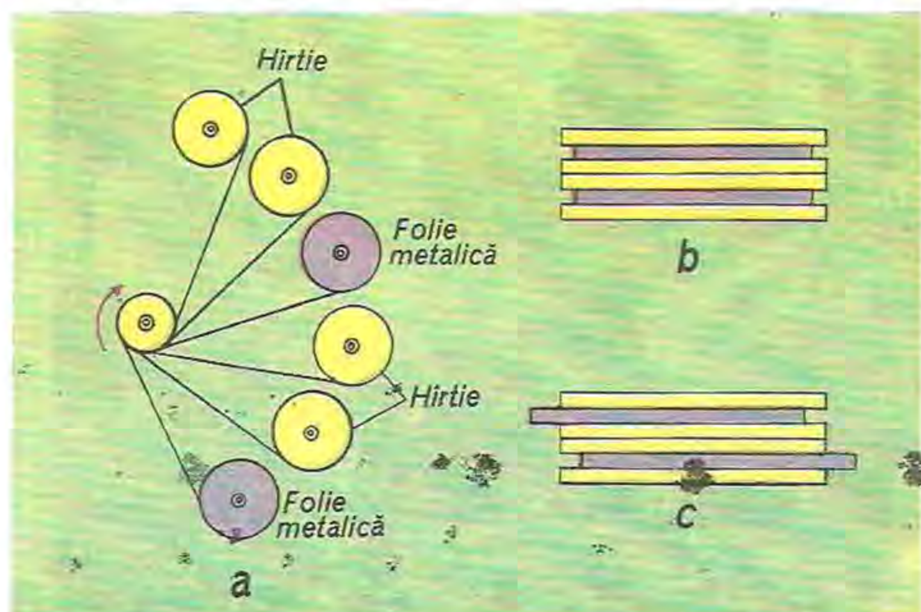


Fig. 2.12. Construcţia condensatoarelor cu hîrtie: *a*) schema de bobinare; *b*) secţiune prin bobina cu armături suprapuse; *c*) secţiune prin bobină cu armături decalate.

tează la capete şi în acest fel efectul inductiv dispare; se realizează în acest mod o zonă care va fi metalizată şi care permite plasarea terminalelor). Secţiunea bobinei condensatorului în cele două variante este ilustrată în figura 2.12 *b* şi *c*. La bobinele inductive, contactul cu exteriorul se face cu ajutorul unor lamele de contact din cupru cositorit, ca în figura 2.13 (pentru bobinele mari se plasează mai multe lamele de contact pe armătură); pentru condensatoarele bobinate neinductiv terminalele sînt din sîrmă de cupru cositorită, sudate de zonele metalizate. Bobinarea se efectuează cu maşini de bobinat automate (figura 2.14 şi 2.15).

După bobinare, condensatoarele se impregnează cu dielectrici lichizi (ulei de condensator, triclordifenil etc.) sau solizi (parafină, răşini epoxidice);

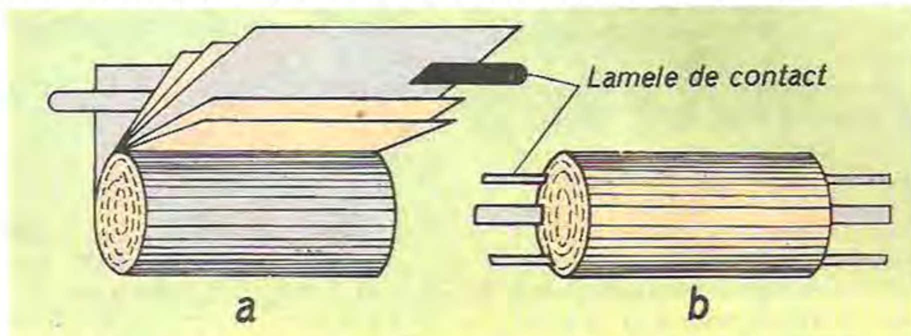


Fig. 2.13. Realizarea contactelor exterioare la condensatoarele cu hîrtie (bobinare inductivă): *a*) plasarea lamelelor de contact; *b*) bobina finală.

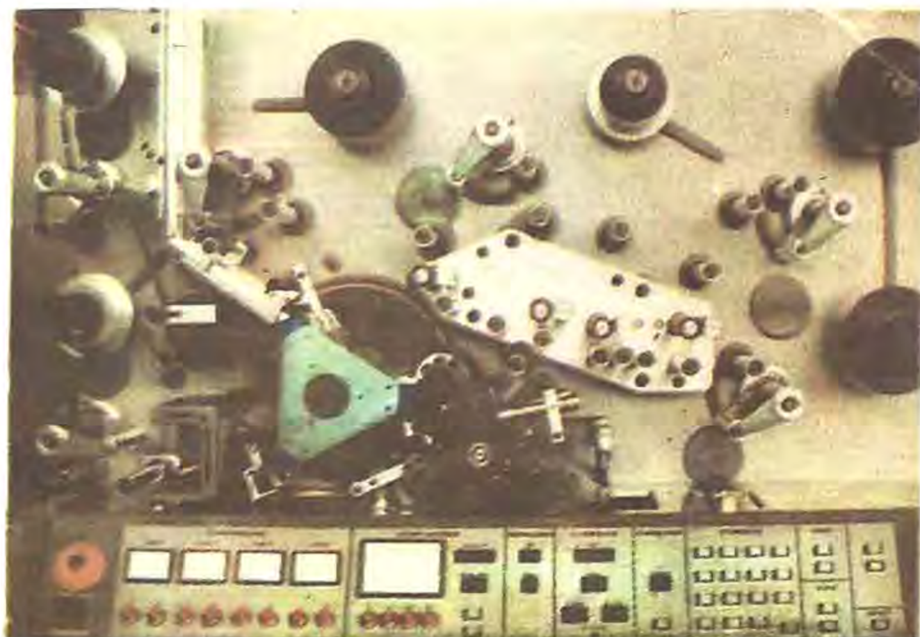


Fig. 2.14. Maşina de bobinat condensatoare cu hîrtie — vedere din faţă.

prin această operaţie se determină creşterea rigidităţii dielectrice (eventualele incluziuni de gaze din dielectric sînt înlocuite cu impregnant).

Condensatoarele sînt protejate prin mulare în „compound" epoxidic sau sînt introduse într-un tub de aluminiu etanşat cu răşină epoxidică sau cu rondele din pertinax cauciucat (cele mai răspîndite) ca în figura 2.16. Se observă că cele patru condensatoare din figură, identice ca aspect, diferă prin gabaritul determinat de lăţimea şi lungimea foliei de aluminiu (fixate în funcţie de capacitatea nomi-

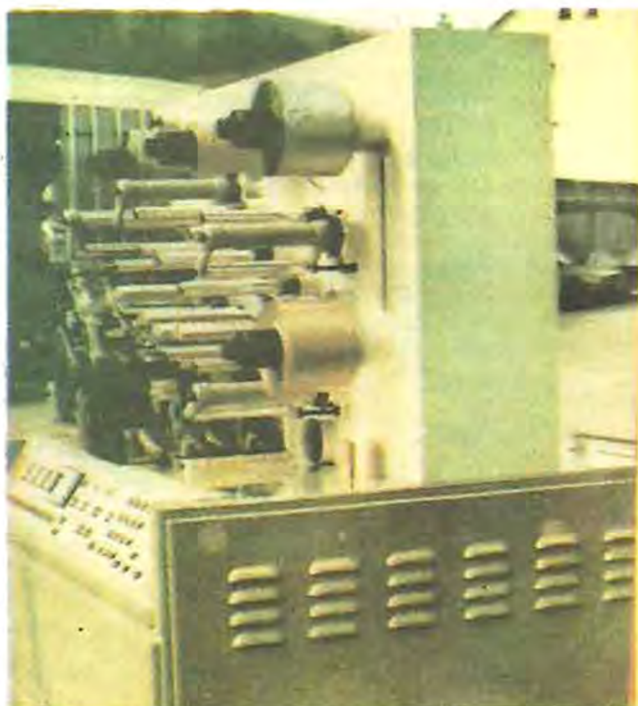


Fig. 2.15. Maşina de bobinat condensatoare cu hîrtie — vedere laterală.

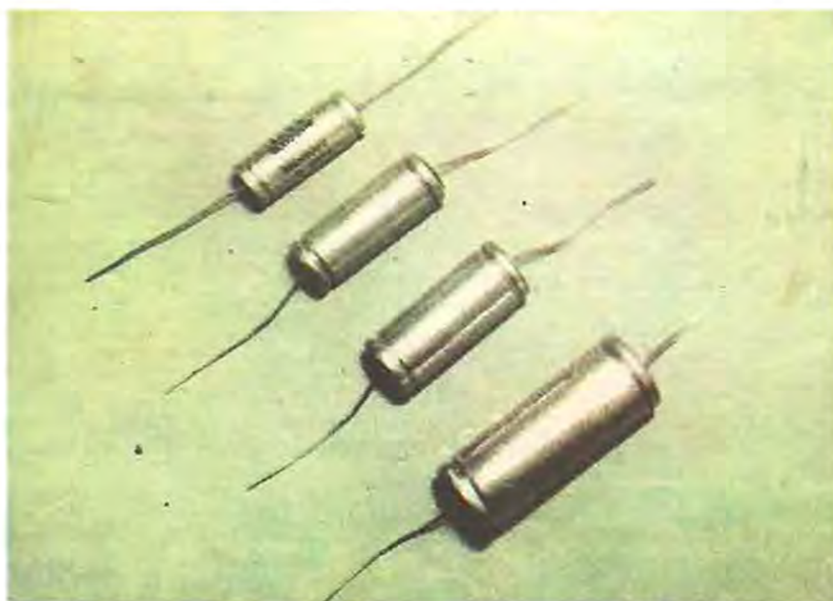


Fig. 2.16. Condensatoare cu hîrtie încapsulate.

nală) şi de numărul de straturi de hîrtie folosit (în funcţie de tensiunea nominală la care este proiectat condensatorul)

b) Condensatoarele *cu hîrtie metalizată* sînt caracterizate printr-o capacitate specifică mai mare, datorită faptului că armăturile sînt pelicule metalice (aluminiu de obicei) foarte subţiri (zecimi de micron) depuse în vid pe hîrtia lăcuită în prealabil. Condensatorul se realizează prin bobinarea a două straturi de hîrtie metalizată, astfel realizată încît armăturile să fie decalate (figura 2.17).

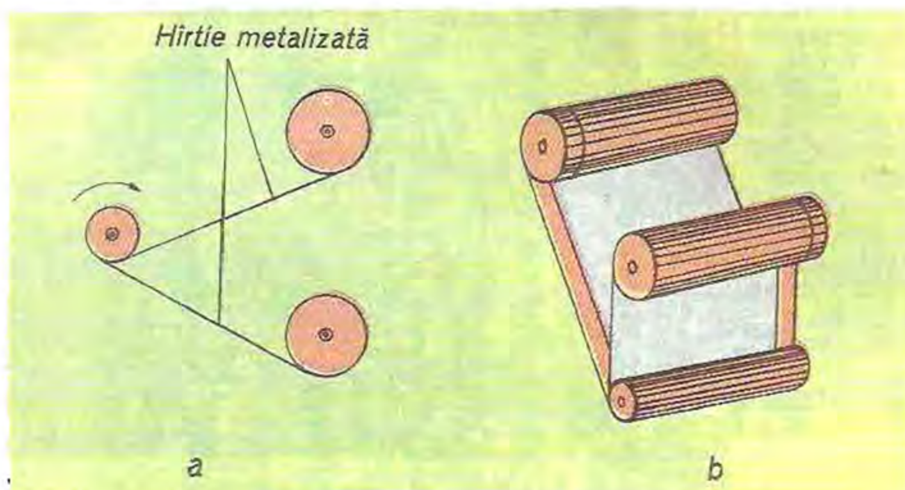


Fig. 2.17. Construcţia condensatoarelor cu hîrtie metalizată *a*) schema de bobinare; *b*) bobina condensatorului; cu pelicule metalice decalate.

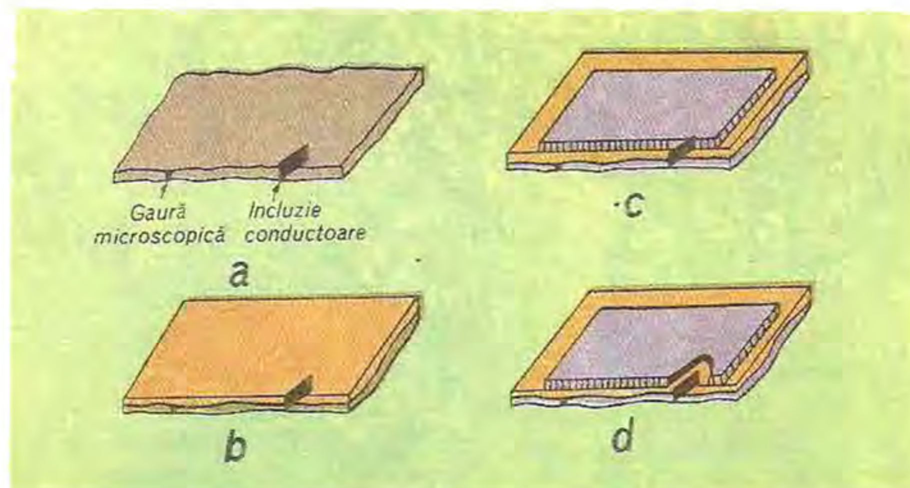


Fig. 2.18. Înlăturarea defectelor dielectricului la condensatoarele cu hîrtie metalizată: *a*) hîrtie de condensator cu defecte; *b*) hîrtie acoperită cu lac; *c*) hîrtie metalizată; *d*) hîrtie metalizată cu defectul înlăturat.

După bobinare, pentru înlăturarea eventualelor zone de scurtcircuit care pot apare între armături datorită imperfecţiunilor dielectricului, se aplică bobinei condensatorului o tensiune progresiv crescătoare, mai mare decît U_n; curenţii locali de scurtcircuit încălzesc puternic pelicula depusă, care se evaporă, înlăturîndu-se astfel regiunea defectă din circuit; fenomenul este ilustrat în fig. 2.18. Suprapunerea hîrtiei astfel încît zonele metalizate să fie decalate permite, prin metalizarea extremităţilor bobinei, înlăturarea efectului inductiv parazit şi lipirea terminalelor din sîrmă de cupru cositorită (prin sudură pe aceste zone). Protejarea acestui tip de condensator se poate realiza în mai multe moduri: în tub de carton, în tub metalic (aluminiu sau cupru) sau prin mulaj în amestec de substanţe plastice (figura 2.19).

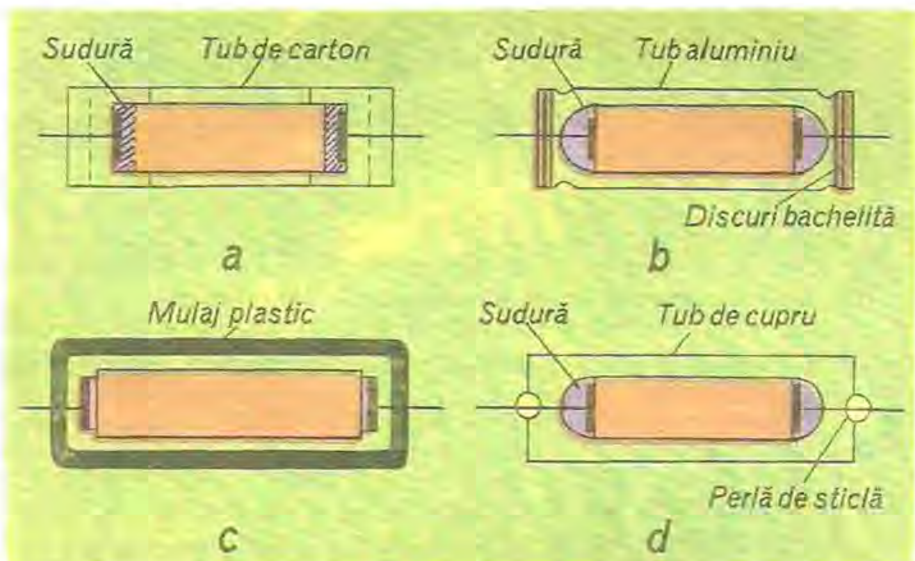


Fig. 2.19. Protejarea condensatoarelor cu hîrtie metalizată: *a*) în tub de carton; *b*) în tub de aluminiu; *c*) mulaj plastic; *d*) tub de cupru.

2.4.3. CONDENSATOARE CU PELICULĂ DIN MATERIAL PLASTIC

Folia din material plastic nu prezintă puncte conductoare sau găuri microscopice şi de aceea se poate folosi un singur strat de dielectric; aceasta duce la creşterea capacităţii specifice a condensatorului şi la reducerea gabaritului său; de asemeni, rezistenţa de izolaţie obţinută este foarte mare.

La acest tip de condensatoare, armăturile sînt folii de aluminiu (de ordinul micronilor), sau pelicule de aluminiu obţinute prin depunerea în vid a aluminiului pe dielectric.

Condensatoarele care folosesc ca dielectric folii de plastic nemetalizat sînt caracterizate prin tangentă a unghiului de pierderi mică, proporţională cu 10^{-4}; dielectricii folosiţi sînt nepolari, de tipul polistirenului, polietilenei, polipropilenei etc.; cel mai folosit este polistirenul, cunoscut şi sub numele de „stiroflex".

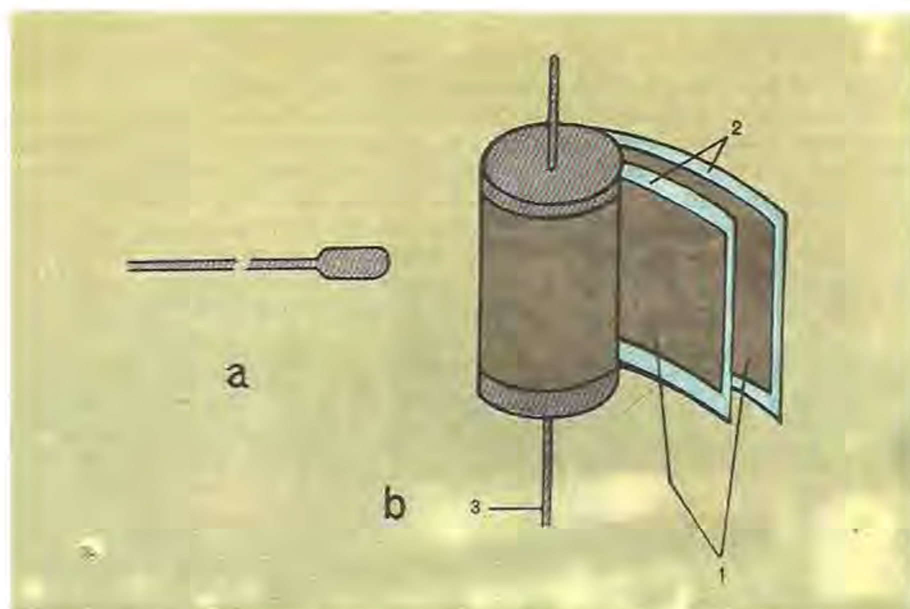


Fig. 2.20. Condensatoare cu polistiren: *a*) terminal; *b*) bobina condensatorului: *1* — armături, *2* — dielectric, *3* — terminale.

a) Condensatoarele cu *polistiren* („stiroflex") au tehnologia asemănătoare condensatoarelor cu hîrtie impregnată: condensatorul este format din folii de aluminiu separate de una sau mai multe folii de polistiren (în funcție de tensiunea nominală a condensatorului) bobinate manual, semiautomat sau automat. Terminalele din sîrmă de cupru dublu cositorită (2.20 *a*), sînt lipite prin sudură prin puncte pe armături înainte de bobinare (pentru condensatoarele bobinate manual) sau în timpul bobinării (la bobinarea semiautomată și automată). Bobina condensatorului este ilustrată în figura 2.20 *b* . După bobinare, condensatorul este supus unui regim termic ușor în urma căruia polistirenul polimerizează și capătă un aspect sticlos, etanșeizînd condensatorul. Marcarea condensatoarelor se face în clar — valoarea nominală și toleranța — și în codul culorilor, pentru tensiunea nominală (culoarea este plasată la extremitatea condensatorului prin colorarea corespunzătoare a unei extremități a rolei de polistiren, înainte de bobinare). Condensatoare cu polistiren de diferite valori sînt ilustrate în fig. 2.21.

b) Condensatoare cu *polietilentereftalat*.

Foliile plastice care se pot metaliza sînt dielectrici polari de tipul: polietilentereftalat, policarbonat, rășină poliamidică, caracterizați prin pierderi în dielectric mari ($tg\,\delta \approx 10^{-2}$); datorită armăturilor depuse sub formă de peliculă, capacitatea specifică crește și se pot obține valori nominale mari (de cîțiva μF) în volum relativ mic.

La noi în țară la I.P.E.E. — Curtea de Argeș se fabrică condensatoare cu dielectric polietilentereftalat („mylar"). Procesul tehnologic al acestor condensatoare este similar cu procesul tehnologic al condensatoarelor cu hîrtie metalizată: pe folia de polietilentereftalat se depune în vid o peliculă discontinuă, subțire, de aluminiu (zecimi de μ). Prin tăierea și rularea foliei



Fig. 2.21. Condensatoare cu polistiren (stiroflex).

metalizate se obțin role în care zona de dielectric neacoperită este situată la dreapta sau la stînga regiunii metalizate (figura 2.22). Pe mașini automate de bobinat, similare cu cele din figura 2.14 și 2.15, se plasează o rolă „dreaptă" și o rolă „stîngă". Prin suprapunerea și bobinarea foliei va rezulta bobina condensatorului; urmează operațiile de metalizare, lipire a terminalelor prin sudură de zona metalizată, regenerarea și protecția condensatorului astfel obținut.

Protejarea condensatoarelor cu myłar se face prin încapsulare în capsule cilindrice sau dreptunghiulare și etanșeizare prin mularea în rășină, prin injecție sau turnare; a treia formă de protejare — mulare în „compound" (lichid vîscos verde, format din amestec de rășini) — se folosește

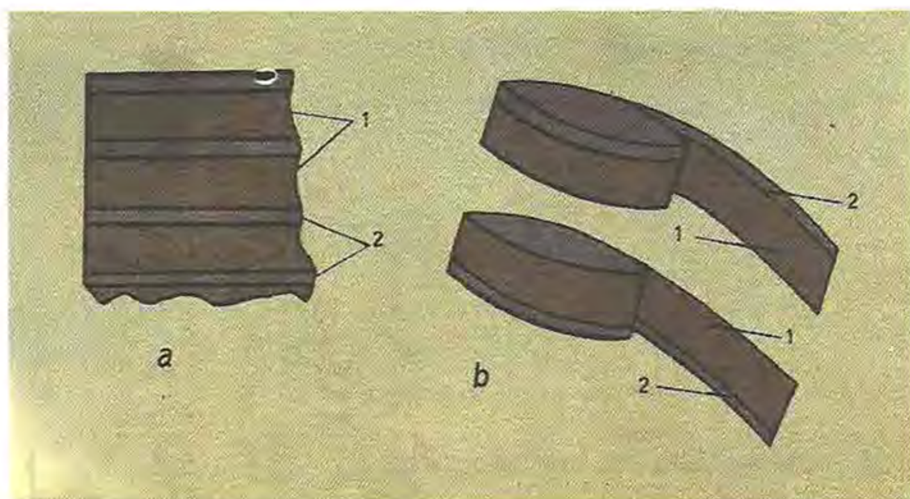


Fig. 2.22. Folie de dielectric metalizată: a) folia netăiată; b) role de folie: 1 — zona metalizată, 2 — zona de dielectric neacoperită.

acum mai rar. În figura 2.23 sînt înfăţişate condensatoare cu polietilentereftalat — produs finit, iar în tabelul 2.4 sînt date principalele caracteristici tehnice.

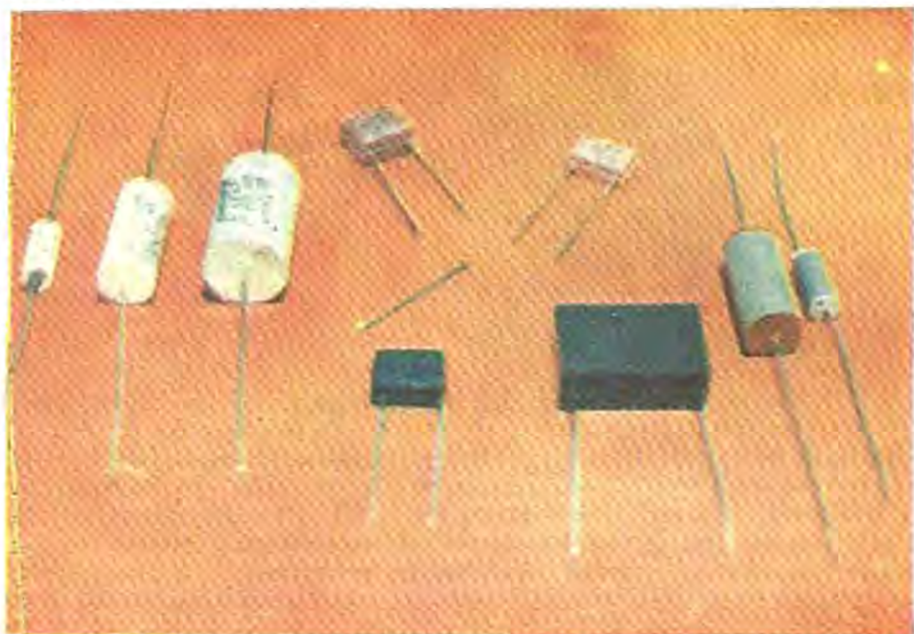


Fig. 2.23. Condensatoare cu polietilentereftalat („mylar").

Folosind o tehnologie similară se obţin şi condensatoare cu dielectric policarbonat metalizat.

2.4.4. CONDENSATOARE CU MICĂ

Mica este un material cu bune proprietăţi dielectrice, folosit acum ceva mai rar. Condensatoarele cu mică sînt plane, cu structură similară condensatoarelor ceramice multistrat: armăturile din folii de staniu, cupru de mare puritate, aluminiu sau peliculă de argint sînt dispuse alternativ între straturile de mică, alcătuind o structură pieptene; scurtcircuitarea la extremităţi a armăturilor impare şi respectiv pare asigură creşterea capacităţii totale şi contactarea terminalelor.

În figura 2.24 sînt prezentate două variante de structură de condensator cu mică.

În fig. 2.25 sînt date cîteva tipuri de condensatoare cu mică.

Acest tip de componentă nu se fabrică în ţară.

2.4.5. CONDENSATOARE ELECTROLITICE

Condensatoarele electrolitice folosesc ca dielectric o peliculă foarte subţire de oxid unipolar (Al_2O_3, Ta_2O_5, Mb_2O_3) care prezintă rezistivitate şi

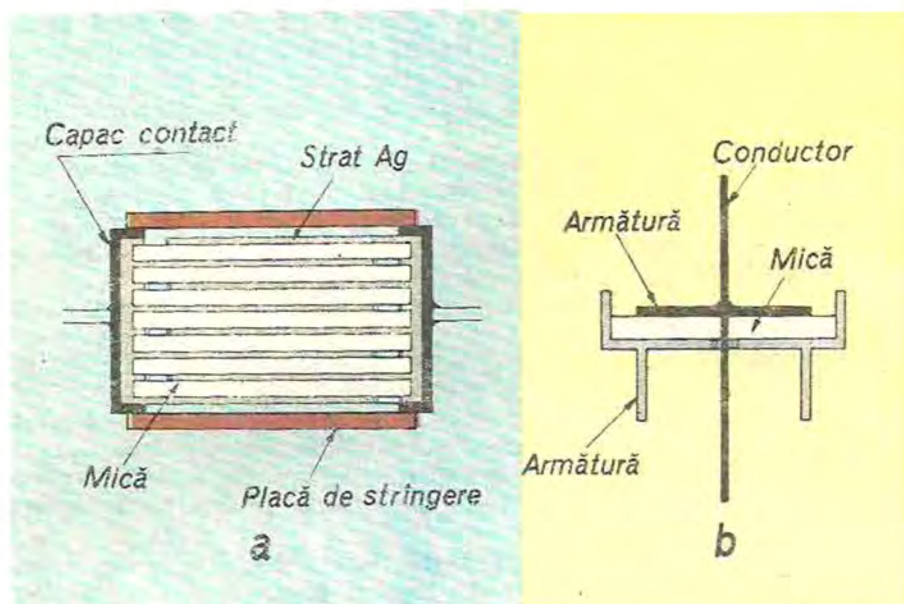


Fig. 2.24. Structuri de condensator cu mica.

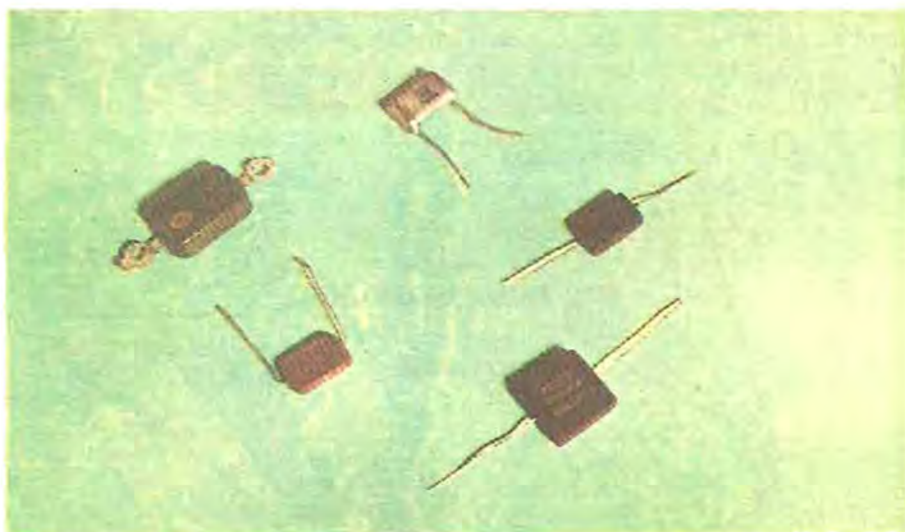


Fig. 2.25. Condensatoare cu mica.

rigiditate dielectrică foarte mare și este stabilă în timp. Condensatorul are una din armături construită din metalul pe care se obține stratul de oxid dielectric. Pentru că această armătură are suprafață utilă foarte mare, iar pelicula dielectrică este foarte subțire (sub 1 μm) se obțin capacități specifice mari (sute de microfarazi pe cm^2). A doua armătură este un electrolit

care poate fi lichid, impregnat într-un dielectric poros sau solid. Pentru a menţine stratul de oxid, armătura metalică trebuie să fie întotdeauna pozitivă faţă de electrolit, deci condensatoarele electrolitice sînt condensatoare polarizate; modul de polarizare prezentat este specific polarizării inverse a unei joncţiuni metal—oxid.

Condensatorul nu poate funcţiona decît în curent continuu; admite totuşi o componentă alternativă redusă, suprapusă peste componenta continuă. Pentru a realiza condensatoare electrolitice nepolarizate, care pot funcţiona şi în curent alternativ se foloseşte soluţia legării în serie a două joncţiuni metal—oxid polarizate invers.

a) *Condensatoarele cu aluminiu semiuscate*, frecvent utilizate în montajele electronice sînt, din punct de vedere constructiv, condensatoare bobinate iar tehnologia este similară tehnologiei condensatoarelor cu hîrtie.

Bobina condensatorului are următoarea structură:

— armătura anod realizată din folii de aluminiu de puritate mare, de grosimi între 50şi120 μm, asperizate electrochimic pentru a avea o suprafaţă efectivă cît mai mare; în urma operaţiei de oxidare, pe această folie se formează un strat dielectric de Al_2O_3, de grosime foarte mică (zecimi de micron).

— două folii de hîrtie (de grosime pînă la 100 μm), care reprezintă suportul în care se va impregna electrolitul (a doua armătură a condensatorului).

— folia catodică este o folie de aluminiu neasperizată, cu rol de a asigura contact electric spre exterior celei de a doua armături — electrolitul. În timpul bobinării, prin nituire sau termocompresie se aplică pe armătura anodică şi pe folia catodică lamele de contact sau terminale. Figura 2.26 ilustrează schema de principiu a bobinării şi structura unui astfel de condensator.

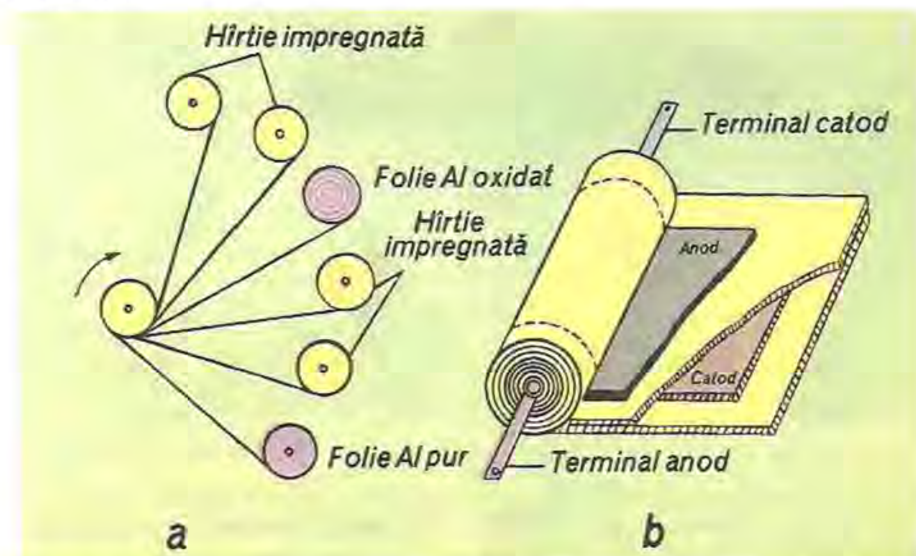


Fig. 2.26. Condensator electrolitic cu aluminiu semiuscat: *a*) schema de principiu a bobinării condensatorului; *b*) structura condensatorului.

După bobinare, urmează operaţia de impregnare a straturilor de hîrtie cu electrolit (acid boric, etilenglicol, hidroxid de amoniu) care trebuie să fie stabil în timp, cu o rezistenţă electrică cît mai mică şi invariabilă cu frecvenţa şi temperatura. Etanşeizarea condensatorului se face prin:

— încapsulare în carcasă de aluminiu prevăzută cu capac din textolit, cu nituri şi cose pentru contactul anodic şi catodic (folia de contact catodic se sudează de peretele carcasei; foliile de contact anodic se sudează de niturile capacului izolant), fig. 2.27.



Fig. 2.27. Condensator electrolitic cu aluminiu în carcasă de aluminiu.

— încapsulare în capsule de plastic şi injectarea capacului în matriţă. În timpul fabricării, pelicula de oxid se deteriorează; prin aplicarea unei tensiuni uşor superioare tensiunii nominale, un timp determinat, pelicula de oxid se reface — operaţia poartă denumirea de formare finală a condensatorului.

Condensatoarele cu aluminiu acoperă gama 0,5÷15 000 µF şi au tensiuni nominale pînă la 500 V; diferite tipuri constructive sînt ilustrate în figurile 2.27 şi 2.28.

b) *Condensatoarele cu tantal semiuscat* sînt similare, din punct de vedere constructiv, cu condensatoarele semiuscate cu aluminiu. Proprietăţile mecanice superioare ale tantalului permit obţinerea unor folii subţiri, iar permitivitatea pentaoxidului de tantal este aproape dublă faţă de cea a oxidului de aluminiu; va rezulta o capacitate specifică mai mare, iar condensatoarele vor avea gabarit mai mic. La ora actuală componentele de acest tip sînt folosite mai rar, fiind înlocuite cu condensatoarele cu anozi sinterizaţi din tantal.

Structural, un astfel de condensator este format din:

— armătura anodică: este un bloc, de obicei cilindric, din pulbere de tantal presată şi sinterizată; la o anumită granulaţie a pulberii, suprafaţa



Fig. 2.28. Tipuri de condensatoare electrolitice cu aluminiu.

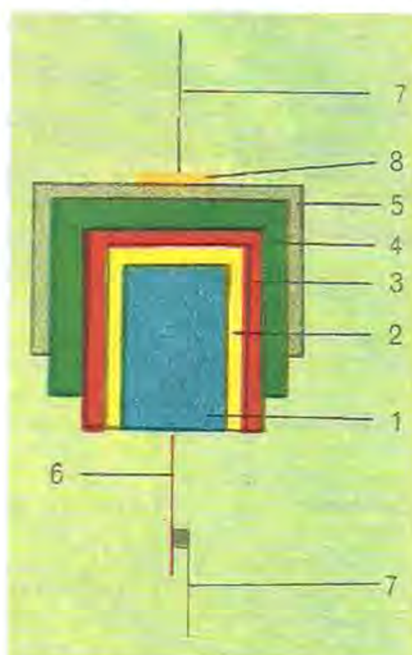


Fig. 2.29. Condensator electrolitic cu anod din tantal sinterizat-secţiune: *1* — armătura anodică din tantal sinterizat; *2* — dielectric din Ta_2O_5; *3* — armătura catodică strat de MnO_2; *4* — strat de grafit; *5* — strat de argint; *6* — conductor portanod; *7* — terminale; *8* — sudura terminalelor.

utilă a anodului este de ordinul 1 m^2/cm^3, ceea ce conferă o capacitate specifică foarte mare condensatorului. Pentru a permite realizarea contactului cu terminalul anodic armătura anodică se presează în jurul unui conductor port-anod confecţionat din tantal metalic.

— dielectricul: este o peliculă de grosime foarte mică ($100 \div 500$ Å) din pentaoxid de tantal (Ta_2O_5).

— armătura catodică: este un strat de bioxid de mangan (MnO_2) obţinut prin imersia repetată a anozilor oxidaţi, 85% din înălţime, în soluţie de azotat de mangan, urmată de piroliză. Acest proces afectează stratul de oxid depus şi acesta va fi refăcut ciclic, prin oxidare electrochimică. Contactul catodic se realizează prin imersia structurii obţinute în grafit coloidal, anozii grafitaţi vor fi apoi argintaţi, prin imersie 85% din înălţime în soluţie de argint coloidal; operaţia de argintare va permite lipirea terminalului catodic.

Structura descrisă este ilustrată în figura 2.29. Terminalele pot fi plasate axial sau radial, acest tip de condensator obţinîndu-se sub două forme constructive:

— condensator tip picătură: terminalele din nichel argintat sînt plasate radial și acoperirea de protecție se realizează prin imersie în compound epoxidic urmată de polimerizare;

— condensator de tip tubular: protejarea se face în tub de cupru stanat, terminalul anodic din nichel argintat este izolat de carcasă prin trecere metal-sticlă; terminalul catodic este din cupru argintat sau stanat.

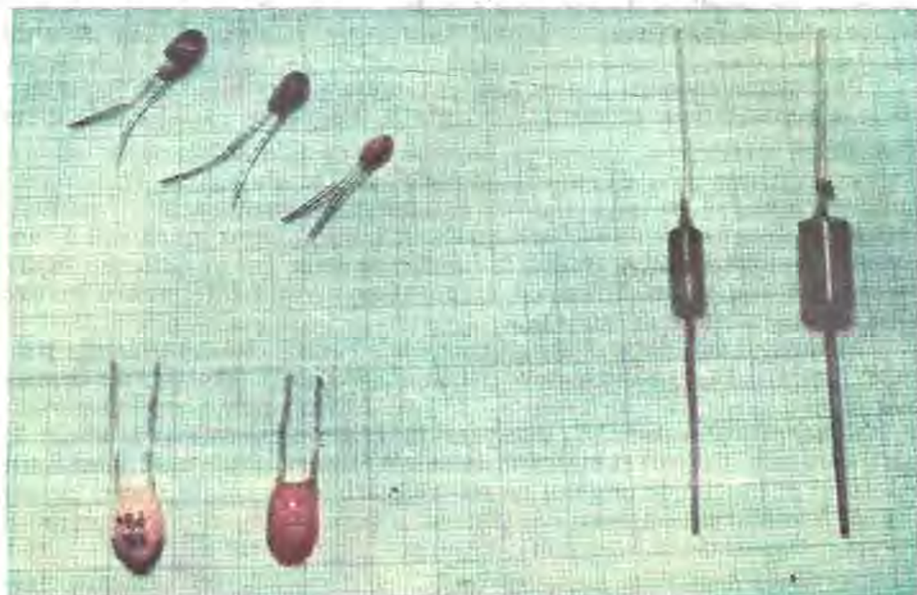


Fig. 2.30. Condensatoare electrolitice cu tantal.

Condensatoarele cu tantal (figura 2.30) acoperă un domeniu larg de temperatură (—80÷+85°C) și au performanțe superioare condensatoarelor cu aluminiu: curent de fugă mai mic, variații reduse (sub 5%) ale capacității cu temperatura; în schimb, tensiunea nominală de lucru ajunge numai pînă la 125 V, iar în regim de impulsuri poate apare fenomenul de străpungere termică (prin doparea stratului de pentaoxid de tantal cu molibden se poate îmbunătăți comportarea în regim de impulsuri). Condensatoarele cu tantal fabricate în țară, la Tehnoton — Iași, acoperă gama 0,1 μF÷680 μF, cu tensiunea nominală limită de 63 V.

Tabelul 2.4 ilustrează principalele caracteristici tehnice ale condensatoarelor fixe de diferite tipuri fabricate în țară la I.P.E.E. — Curtea de Argeș, Tehnoton — Iași și I.P.R.S. — Băneasa.

2.5. CONDENSATOARE VARIABILE ȘI SEMIVARIABILE

a) Condensatoarele *variabile* sînt componente a căror capacitate poate fi modificată între anumite limite impuse de funcționarea circuitelor electronice; sînt în general condensatoare de acord în circuite de recepționare a unui semnal radio sau în circuite oscilante.

Parametrii condensatoarelor variabile sînt similari cu cei ai condensatoarelor fixe: capacitatea nominală şi toleranţa acesteia, tensiunea nominală şi tangenta unghiului de pierderi, coeficienţi de variaţie ai capacităţii sub acţiunea temperaturii şi a altor factori ambianţi.

Trebuie menţionat că prin capacitate nominală se înţelege de regulă valoarea maximă, C_{max}, pe care o poate avea capacitatea condensatorului variabil. Capacitatea minimă reprezintă valoarea minimă a capacităţii ce se poate obţine la bornele condensatorului; valorile obişnuite sînt de ordinul $(0{,}05 \div 0{,}2)\ C_{max}$.

Parametrii specifici pentru condensatoarele variabile sînt: legea de variaţie a capacităţii şi momentul de rotaţie. Legea de variaţie este definită de funcţia:

$$C=f(C_{min}, C_{max}, \varphi),$$

unde φ reprezintă, în radiani, grade sau procente, poziţia relativă a rotorului faţă de stator. Legea de variaţie poate fi: liniară, logaritmică sau o funcţie directă sau inversă de gradul 2, în funcţie de domeniul de aplicaţie (aparate de măsură sau radiotehnică) şi de parametrul care interesează în circuit (frecvenţă, lungime de undă).

Momentul de rotaţie al armăturii mobile caracterizează uşurinţa şi siguranţa reglării capacităţii; în mod obişnuit, valoarea acestuia nu depăşeşte 500 μNm.

Condensatorul variabil cu aer (cel mai răspîndit) este alcătuit din două părţi distincte, rotorul şi statorul: lamelele statorului pătrund între bornele rotorului în funcţie de unghiul de rotaţie, variind suprafaţa şi deci capacitatea condensatorului. Armăturile statorului şi rotorului sînt din aluminiu sau alamă, de grosime (0,5÷1 mm); în funcţie de numărul de circuite care trebuie acordate simultan, condensatoarele variabile cu aer se realizează cu 1÷3 secţiuni identice sau diferite.



Fig. 2.31. Condensator variabil cu aer asamblat şi părţile lui componente: rotor, stator, lamelă stator, lamelă rotor.

În figura 2.31 este ilustrat cel mai utilizat condensator variabil cu aer folosit la realizarea acordului la radioreceptoare; este prezentat asamblat precum şi părţile lui componente: rotor, stator, lamelă de rotor, lamelă de stator. Se observă că o astfel de componentă implică o construcţie mecanică complicată şi dificilă, cu gabarit mare, capacitate mică (avînd ca dielectric aerul) şi preţ de cost ridicat.

Pentru condensatoarele variabile care lucrează în regim de înaltă tensiune (de ordinul kilovolţilor) se folosesc ca dielectrici gaze electronegative (de exemplu hexaflorură de sulf, diclordiflormetan, hexafluoretan, octofluorciclobutan sau tetraclorură de carbon) sau incinte vidate.

Pentru a creşte capacitatea specifică s-au folosit dielectrici solizi în construcţia condensatoarelor variabile: folii de materiale sintetice termoplaste, plasate între rotor şi stator; condensatoarele variabile cu polistiren sau politetrafloretilenă au dimensiuni mici şi se pot plasa pe cablaje imprimate.

b) Condensatoarele *reglabile*, denumite şi semivariabile sau trimeri, se caracterizează prin faptul că valoarea capacităţii poate fi reglată la punerea în funcţiune sau la verificări periodice; îndeplinesc rolul unor condensatoare fixe în timpul funcţionării. Din punct de vedere constructiv există condensatoare reglabile plane, cilindrice sau bobinate; dielectricul folosit este aerul, materialele ceramice (dielectric anorganic) sau materiale termoplastice nepolare (dielectric organic).

Condensatorul semivariabil cilindric cu aer (figura 2.32) este format din stator şi rotor, prevăzute cu lamele concentrice. Prin mişcarea rotorului,

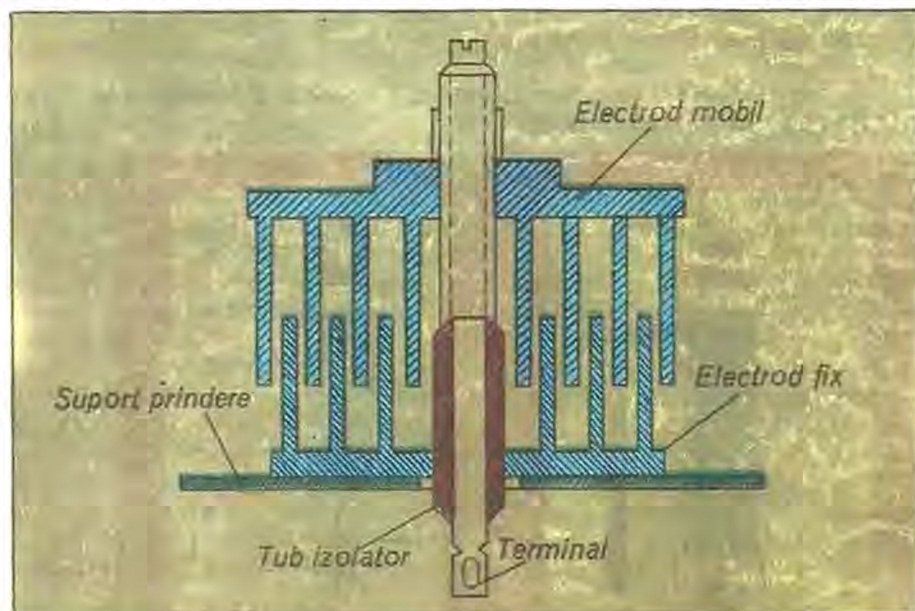


Fig. 2.32. Condensator semivariabil cilindric cu aer

armăturile lui se suprapun mai mult sau mai puţin cu armăturile statorului, modificînd suprafaţa condensatorului realizat; capacitatea maximă poate ajunge la cîteva zeci de picofarazi.

Condensatoarele semivariabile ceramice (trimerii ceramici) plane și cilindrice, sînt cele mai răspîndite, valoarea maximă a capacității putînd ajunge pînă la 200 pF.

Trimerii ceramici plani (figura 2.33) au un stator din ceramică pe care este depusă prin serigrafie o armătură din argint; a doua armătură este depusă prin pulverizare pe rotorul ceramic (cu proprietăți dielectrice, ceramică tip *II*, uzual). Repere mecanice permit suprapunerea rotorului peste stator și rotirea acestuia, suprafețele de contact avînd o finisare cît mai bună.



Fig. 2.33. Condensator semivariabil ceram:c plan.

Condensatoarele ceramice cilindrice (figura 2.34) au un corp ceramic cilindric pe a cărui suprafață exterioară se depune o armătură; a doua armă-

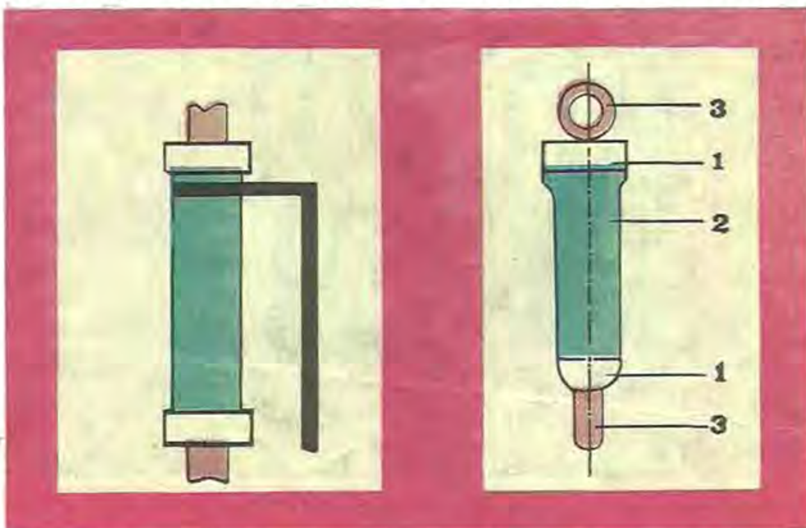


Fig. 2.34. Trimer ceramic cilindric.

Fig. 2.35. Condensator de trecere: *1* — dielectric; *2* — armătura exterioară; *3* — armătura interioară.

tură este mobilă, sub forma unui şurub care poate înainta în interiorul cilindrului variind astfel capacitatea la borne; capacitatea maximă a unui astfel de trimer este 3÷20 pF.

Condensatoarele reglabile cu dielectric organic sînt cilindrice şi cu variaţia capacităţii între 0,5÷3,5 pF; se realizează prin deplasarea unui piston metalic (armătură mobilă) în interiorul unui tub metalic (armătură fixă) care are depus pe peretele interior un strat de zecimi de milimetru de material termoplastic nepolar.

Parametrii condensatoarelor fixe şi variabile fabricate în ţară sînt cuprinşi în tabelul 2.4.

Înainte de a încheia trebuie să amintim de o categorie aparte de condensatoare — condensatoarele de trecere; se folosesc la trecerea printr-un ecran electromagnetic a unei tensiuni de alimentare. Pentru a nu perturba funcţionarea circuitului din interiorul ecranului, acest condensator trebuie să prezinte un scurtcircuit la frecvenţa de lucru. Un astfel de condensator este ilustrat în figura 2.35: pe un suport din ceramică de tip *II* se depune armătura exterioară (care se lipeşte de pereţii orificiului practicat în ecran): prin interior se plasează armătura interioară de trecere de la un capăt la celălalt al condensatorului.

2.6. COMPORTAREA ÎN CURENT ALTERNATIV A CONDENSATOARELOR

Condensatorul — componentă ideală prezintă în curent alternativ o reactanţă capacitivă: $X_c=\frac{1}{\omega C}$, iar defazajul dintre curentul I, care străbate condensatorul şi tensiunea alternativă, U, aplicată, este de 90°, tensiunea fiind în urma curentului (v. fig. 2.1).

Componenta reală de capacitate C prezintă însă o anume schemă echivalentă în funcţie de structura şi tehnologia adoptată. Astfel trebuie să se ţină seama de o serie de considerente, cum ar fi:

— terminalele şi armăturile care sînt din cupru, aluminiu, argint, sau aliaje, au o conductibilitate finită, deci vor prezenta o rezistenţă, r_s, la trecerea curentului.

— materialele dielectrice (hîrtia, materialele plastice) nu sînt izolatoare perfecte, prin dielectric trecînd un curent rezidual (care, oricît ar fi de mic, produce în timp descărcarea unui condensator); condensatorului ideal de capacitate C i se va adăuga în paralel o rezistenţă, r_p, echivalentă acestui fenomen.

— în general se mai adaugă în paralel cu condensatorul încă o rezistenţă, R_p, care exprimă pierderile din dielectric. Dacă tg δ_ε este tangenta unghiului de pierderi datorate dielectricului, atunci:

$$R_p=\frac{1}{\omega C\ \mathrm{tg}\ \delta_\varepsilon}$$

— trecerea curentului prin terminale, armături şi prin dielectric, creează un cîmp magnetic, deci apare un efect de inductivitate care creşte o dată cu frecvenţa; fenomenul poate fi echivalat prin apariţia în schema echivalentă a unei inductanţe L.

Tabelul 2.4.

Performanțe ale condensatoarelor fabricate în R.S.R.

Tipul condensatorului	Seria	Capacitatea nominală	Parametrii electrici	Banda de frecvență	Utilizări
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
ceramice tip *I*	CG CO	0,8 pF÷1 nF	— toleranța: $\pm(0{,}25;\ 0{,}5;\ 1)$ pF pentru $C_n \leqslant 10$ pF $\pm5\%$; $\pm10\%$ pentru $C_n \geqslant 10$ pF — $\text{tg}\,\delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$ — $U_n = 63$; 500 V_{cc} — $R_{iz} \geqslant 10$ GΩ — $\alpha_c = (-750 \div \pm250)$ ppm/°C	înaltă frecvență	echipamente electronice industriale și profesionale
ceramice tip *II*	CL C(A, B, C)	33 pF÷100 nF	— toleranța: $\pm10\%$; $\pm20\%$ $(-20\%;\ +80\%)$; $(-20\%;\ +50\%)$ — $\text{tg}\,\delta \leqslant 0{,}035$ — $U_n = 25$ V_{cc}; 500 V_{cc}; 1, 2, 3 KV_{cc} — $R_{iz} \geqslant 3$ GΩ — coeficient nedefinit de variație cu temperatura între $(-40 \div +80)$ °C	înaltă frecvență	circuite de cuplare și decuplare, filtre în echipamente de telecomunicații și industriale, circuite de înaltă tensiune
ceramice multistrat tip *I*	MC	3,3 pF÷27 nF	— toleranță: $\pm(1,\ 2,\ 5,\ 10,\ 20)\%$ — $U_n = 25$, 50, 100, 200 V_{cc} — $\text{tg}\,\delta \leqslant 15 \cdot 10^{-4}$ — $R_{iz} \geqslant 10$ GΩ — variație liniară cu temperatura între −55°C și 125°C, cu $\alpha_c = \pm30$ ppm/°C	fără restricții	echipamente electronice profesionale
ceramice multistrat tip *II*	MZ MX	100 pF÷1,5 μF	— toleranța: $\pm(5,\ 10,\ 20)\%$ — $\text{tg}\,\delta \geqslant 3 \cdot 10^{-2}$ — $U_n = 25$, 50, 100, 200 V_{cc} — $R_{iz} \geqslant 4$ GΩ pentru $C_n \leqslant 25$ nF $R_{iz}\ C_n = 100$ s pentru $C_n > 25$ nF — între −55°C și +125°C, variația capacității $\frac{\Delta C}{C} \leqslant \pm20\%$	fără restricții	echipamente electronice profesionale

a	b	c	d	e	f
condensatoare cu hîrtie	HC, HA, HPI, HPA, HSA, HPR, HAM, HZ, HS, HMz	0,01 μF÷20 μF	— toleranță: ±20% — tg $\delta \leq 0{,}01$ — U_n=220 V÷1 300 V_{cc} — $R_{iz} \geq 6$ GΩ — între —25°C și +85°C variație mare a capacității cu temperatura $\Delta C_n = (0 \div -50\%) C_n$	joasă frecvență	circuite de curent continuu, cuplări, decuplări, filtre antiparazitare, circuite de putere, porniri motoare
condensatoare cu polistiren (stiroflex)	PS	47 pF÷100 nF	— toleranță: ±(2,5; 5; 10; 20)% — tg $\delta \leq 5 \cdot 10^{-4}$ — U_n=25÷1 000 V_{cc} — $R_{iz} \geq 100$ GΩ — α_c=(—60÷220) ppm/°C	f<100 KHz datorită inductanței parazite	echipamente electronice industriale și aparatură de larg consum
condensatoare cu polietilentereftalat (mylar)	PMP	10 nF÷6,8 μF	— toleranță: ±(5; 10; 20)% — tg $\delta \leq 0{,}01$ — U_n=100÷630 V_{cc} — $R_{iz} \geq 3{,}75$ GΩ pentru $C_n \leq 0{,}33$ μF $R_{iz} \cdot C_n \geq 1\,250$ s pentru $C_n > 0{,}33$ μF — între — 40 și 80°C $\Delta C_n = (-4\% - +2\%) C_n$	f<100 KHz f>100 MHz	aparatură industrială și de larg consum
condensatoare cu policarbonat metalizat	PCM	0,01 μF÷1 μF	— toleranță: ±10%; ±20% — tg $\delta < 70 \cdot 10^{-4}$ — U_n=63÷400 V_{cc} — $R_{iz} \geq 50$ GΩ pentru $C_n \leq 0{,}33$ μF $R_{iz} \cdot C_n > 10^4$ s pentru $C_n > 0{,}33$ μF		
condensatoare electrolitice cu aluminiu (miniatură)	EG	1 μF÷2 200 μF	— toleranță: —20%÷+100% — tg $\delta \leq 0{,}45$ — U_n=3÷350 V_{cc} — polarizate	joasă frecvență	circuite de cuplare, decuplare, filtre în echipamente industriale, aparatură de larg consum
condensatoare electrolitice cu aluminiu, de mare capacitate	EG	100 μF÷10^4 μF	— toleranța: —20%÷+50% — tg $\delta \leq 0{,}75$ — U_n=70÷450 V_{cc} — polarizate	joasă frecvență	filtre după redresare

a	b	c	d	e	f
condensatoare electrolitice cu tantal	CTS	0,1 μF÷68 μF	— toleranță: ±10%; ±20% (—20%; +30%) — $\mathrm{tg}\,\delta \leq 0{,}1$ — $U_n = 3 \div 63\ V_{cc}$	joasă frecvență	cuplarea și decuplarea circuitelor de joasă frecvență din radioreceptoare, televizoare, aparatură industrială și specială
condensatoare ceramice ajustabile disc	CT	2/7÷5/15 pF 3/10÷10/60 pF 5/20÷20/100 pF (tip II)	— $\mathrm{tg}\,\delta < 20\ 10^{-4}$ — $U_n = 250,\ 350\ V_{cc}$ — $\alpha_c = (-1\,800 \div +100)$ ppm/°C	înaltă frecvență	circuite electronice în radiofrecvență
condensatoare ajustabile cilindrice	CTF	0,5/3÷3/15 pF 1/9 pF	— $\mathrm{tg}\,\delta < (2 \div 5)\,10^{-3}$ — $U_n = 250,\ 400$ V	$f < 250$ MHz	circuite de înaltă frecvență în aparatura radio-TV
variabile cu aer		25,60 pF	— $\mathrm{tg}\,\delta < 2\ 10^{-3}$ — $U_n = 450\ V_{cc}$ — unghi efectiv de rotație 180°+30°	înaltă frecvență	receptoare de radio-difuziune
variabile cu dielectric solid		35 pF	— $\mathrm{tg}\,\delta \leq 7\ 10^{-3}$ — $U_n = 50$ V — unghi efectiv de rotație 174°+3°	înaltă frecvență	receptoare de radio-difuziune
condensatoare de trecere		1 nF		înaltă frecvență	treceri prin ecran electromagnetic

Impedanța condensatorului a cărui schemă echivalentă este dată în figura 2.36, se poate scrie:

$$Z=r_s+j\omega L+\frac{1}{\frac{1}{r_p}+j\omega C+\frac{1}{R_p}}=r_s+j\omega L+\frac{1}{\frac{1}{r_p}+j\omega C+\omega C\,\mathrm{tg}\,\delta_s}$$

Dacă notăm:

$\mathrm{tg}\,\delta_p=\frac{1}{r_p\omega C}$ — tangenta unghiului de pierderi în rezistența paralel

$C'=C[1+(\mathrm{tg}\,\delta_p+\mathrm{tg}\,\delta_s)^2]$ — capacitatea echivalentă,

$\mathrm{tg}\,\delta_s=\omega C'r_s$ — tangenta unghiului de pierderi în rezistența serie, expresia impedanței se poate pune sub forma:

$$Z=R+\frac{1}{j\omega C_s}$$

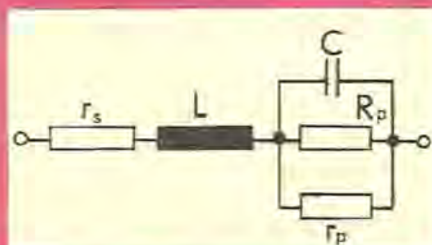


Fig. 2.36. Schema echivalentă a condensatorului tehnic real: C — capacitatea; r_s — rezistența serie datorată terminalelor și armăturilor; L — inductanța parazită echivalentă efectului inductiv; r_p — rezistența datorată conducției în dielectric; R_p — rezistența datorată pierderilor în dielectric.

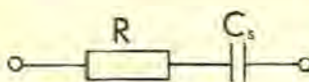


Fig. 2.37. Schema echivalentă serie.

Această relație reprezintă parametrii unei scheme echivalente serie (fig. 2.37), unde:

$$R=\frac{\mathrm{tg}\,\delta}{\omega C'}$$

$$C_S=\frac{C'}{1-\omega^2LC'}$$

$\mathrm{tg}\,\delta=\mathrm{tg}\,\delta_p+\mathrm{tg}\,\delta_s+\mathrm{tg}\,\delta_s$ ($\mathrm{tg}\delta$ — tangenta unghiului de pierderi în condensator).

Dacă scriem frecvența de rezonanță a condensatorului: $\omega_r=\frac{1}{\sqrt{LC}}$ condensatorul echivalent serie poate fi pus sub forma:

$$C_S=\frac{C'}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}$$

Din analiza acestor relații care dau elementele echivalente ale unui condensator real, se observă că atît capacitatea echivalentă cît și rezistența echivalentă depind de frecvență.

Prin urmare, în funcție de domeniul de frecvență al circuitului considerat, se va alege tipul constructiv de condensator care oferă elemente parazite neglijabile în domeniul respectiv; la ora actuală condensatoarele ceramice multistrat tind să înlocuiască condensatoarele ceramice simple, pe cele cu hîrtie sau cu folie plastică, iar condensatoarele electrolitice cu tantal, în măsura posibilului, înlocuiesc condensatoarele electrolitice cu aluminiu.

Capitolul 3

BOBINE

3.1. INDUCTIVITATEA/INDUCTANŢA UNEI BOBINE

Bobina/inductorul este o componentă pasivă de circuit pentru care — în mod ideal — între tensiunea la bornele sale, $u(t)$ şi curentul ce o parcurge, $i(t)$, există relaţia: $u=L\frac{di}{dt}$

unde L [nH], [μH], [mH], [H] = inductivitatea/inductanţa bobinei şi reprezintă principalul parametru caracteristic al acesteia.

Există două interpretări posibile ale noţiunii de inductanţă:

a) Ca proprietate a unui circuit electric de-a se opune oricărei variaţii a curentului electric ce-l parcurge.

Se ştie că, într-un circuit electric, variaţiile curentului $i(t)$ şi ale fluxului magnetic $\Phi(t)$ sînt interdependente întrucît, pe de o parte, orice variaţie a curentului implică o variaţie corespunzătoare a fluxului, iar pe de altă parte, modificarea fluxului magnetic implică apariţia unei t.e.m. de autoinducţie avînd tendinţa de-a se opune oricăror variaţii ale curentului/fluxului din circuit.

Întrucît fluxul magnetic şi curentul electric variază direct proporţional, inductanţa reprezintă coeficientul de proporţionalitate respectiv, conform relaţiei

$$\Phi(t)\ [\mathrm{Wb}]=L\,[\mathrm{H}]\ i(t)\ [\mathrm{A}]$$

În consecinţă, unitatea de măsură a inductanţei, henry-ul [H], reprezintă raportul dintre fluxul magnetic de 1 Wb (Weber) şi curentul electric de 1 A.

b) Ca proprietate a bobinei de-a acumula energie în cîmp magnetic.

Se ştie că, aplicînd o tensiune continuă la bornele unei bobine, aceasta produce o t.e.m. de autoinducţie avînd tendinţa de-a se opune creşterii curentului. În consecinţă, întrucît această variaţie are totuşi loc (de la 0 la I) rezultă că sursa de tensiune a cheltuit o energie suplimentară pentru a învinge opoziţia bobinei. Este evident că această energie ($W_m=LI^2/2$) s-a înmagazinat în cîmpul magnetic al bobinei, iar la deconectarea sursei de tensiune continuă, bobina se comportă ca un generator de energie (permiţînd — prin descărcarea energiei acumulate — scăderea curentului de la I la 0).

Ca şi rezistenţa rezistoarelor, inductanţa unei bobine depinde de temperatură conform unei relaţii de forma:

$$L=L_0[1+\alpha_t(T-T_0)]$$

unde:

L_0 — inductanţa bobinei la temperatura T_0

α_t — coeficientul termic al inductanţei

În general, inductanța unei bobine depinde de structura, geometria și dimensiunile acesteia.

Calculul inductanței se efectuează anterior realizării bobinei — în general cu ajutorul unor formule/relații empirice, tabele sau diagrame [10], [11], [15].

Astfel, inductanța L a unei bobine fără miez, de lungime l [cm], diametru D [cm] (sau secțiune S [cm^2]) și avînd N spire se poate calcula cu relațiile:

$$L[\mu H]=4\pi N^2 S/l \text{ — dacă } l \gg D$$
$$L[\mu H]=aN^2 D\cdot 10^{-3} \text{ — dacă } l \sim D$$

S-a notat cu a un coeficient a cărui valoare (în funcție de raportul l/D), se află tabelată în lucrări de specialitate [10], [15].

În cazul unei bobine cu miez magnetic (de permeabilitate magnetică μ) se utilizează relația generală: $L=\mu N^2 S/l$

3.2. STRUCTURA ȘI CLASIFICAREA BOBINELOR

Datorită diversității foarte mari a bobinelor utilizabile în radioelectronică, nu există o producție de serie mare (standardizată) a acestora, ca la rezistoare și condensatoare, astfel încît bobinele se construiesc numai de către utilizatori (în serii mici sau chiar ca unicat — în funcție de necesități). În general, fiecare circuit care include bobine se calculează pornind de la valorile normalizate ale celorlalte componente pasive.

Elementele componente ale unei bobine sînt (în cazul general): carcasa, înfășurarea, miezul și ecranul. Cu excepția înfășurării, celelalte elemente nu intră în mod obligatoriu în structura unei bobine:

a) *Carcasa* — constituie suportul pe care se înfășoară conductorul bobinei. Ea are, în general, o formă tubulară și este realizată din materiale ușor de prelucrat, dar cu proprietăți izolatoare deosebite și rezistență mecanică satisfăcătoare. În ordinea crescătoare a performanțelor, cele mai utilizate materiale pentru carcase sînt: cartonul electroizolant, pertinaxul, textolitul, materialele termorigide (bachelită), materialele termoplastice (polistiren, policlorvinil, polietilenă, teflon), materialele ceramice.

Din punct de vedere constructiv, carcasele tubulare pot avea secțiunea circulară (cel mai frecvent), pătrată sau dreptunghiulară; ele pot fi prevăzute cu flanșe — la extremități (pentru delimitarea/fixarea înfășurărilor) sau intermediar (tipul „cu galeți" — pentru reducerea capacităților parazite). Flanșele pot fi prevăzute cu orificii prin care se scot terminalele înfășurărilor și cu piese (coșe, capse, știfturi etc.) pentru fixare pe șasiu (sau pe placa de circuit imprimat).

b) *Înfășurarea* (bobinajul) — constituie elementul principal și indispensabil al oricărei bobine. Se caracterizează prin: diametrul/secțiunea conductorului, număr de spire, pas, număr de straturi, număr de secțiuni.

Cel mai frecvent se utilizează conductoare din cupru avînd secțiune circulară și diametre normalizate. În cazul unor curenți foarte mari, se utilizează conductoare cu secțiune dreptunghiulară sau pătrată (uneori chiar tubulară — pentru a permite răcirea cu apă) — inclusiv din aluminiu.

În cazul bobinelor de joasă frecvență (JF), conductoarele sînt izolate cu email, cu email şi fibre textile sau cu fibre anorganice (sticlă), iar în cazul bobinelor de înaltă frecvență (IF) se utilizează conductoarele lițate („lița de RF") constituite din 7—15 conductoare de diametru foarte redus şi izolate individual (ansamblul lor fiind izolat — cu bumbac sau mătase).

În domeniul frecvențelor foarte înalte (FIF/UIF) se utilizează conductoare din cupru argintat, izolate cu email-mătase sau chiar neizolate (în cazul spirelor puține şi rare).

Bobinajele se realizează fie monostrat (cilindrice — cu sau fără carcasă, toroidale sau „în titlu D"), fie multistrat (tip „spiră după spiră", piramidal, „fagure" — propriu-zis sau universal).

Procesul tehnologic de bobinare se încheie cu impregnarea bobinei — în scopul protejării ei împotriva umidității dar şi pentru a-i conferi o robustețe mecanică suficientă (prin rigidizarea înfăşurărilor). Impregnarea constă în umplerea interstițiilor bobinajului cu lac de impregnare electroizolant.

Tehnologic, bobinajele se execută cu maşini (semi)automate de bobinat — special construite pentru anumite tipuri de bobine şi bobinaje. Operațiile de impregnare se realizează manual.

c) *Miezul* — intră în componența majorității bobinelor, întrucît permite obținerea unor inductivități de valori mai mari şi reglabile (în limite relativ restrînse). Se utilizează miezuri magnetice (din materiale magnetodielectrice sau din ferite) şi miezuri nemagnetice (din alamă sau cupru).

d) *Ecranul* — este facultativ şi se utilizează pentru a înlătura potențialele cuplaje parazite — electrice sau magnetice — cu generatoare/receptoare exterioare bobinei.

În consecință, criteriile de clasificare a bobinelor pot fi:

— considerente constructive (forma/tipul carcasei, tipul bobinajului, numărul de spire/straturi; prezența/absența miezului sau ecranului etc.);

— parametrii caracteristici obtenabili (în special inductivitatea, factorul de calitate şi gama frecvențelor de lucru);

— domeniul aplicațiilor preconizate (radio, TV, electronică de putere etc.).

3.3. TIPURI CONSTRUCTIVE DE BOBINE

Cel mai simplu tip de bobină (fig. 3.1) conține un singur strat de sîrmă — de ex. din cupru emailat (CuEm) — bobinată spiră lîngă spiră, pe o carcasă tubulară, fără miez magnetic.

Notînd:

$2r$ [cm] = diametrul exterior al carcasei,

n = numărul de spire bobinate,

l [cm] = lățimea bobinajului pe carcasă,

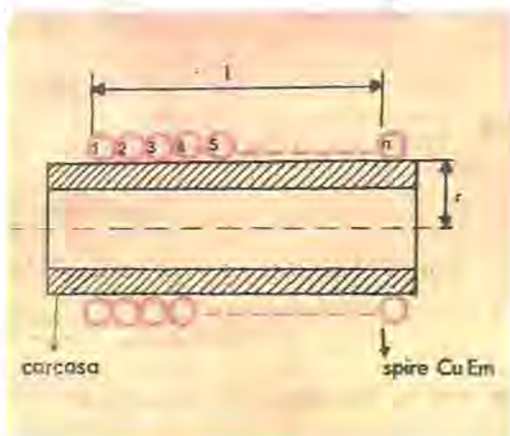


Fig. 3.1. Bobină cilindrică, monostrat.

se demonstrează (cu condiția ca $l>0{,}8\,r$), că inductivitatea L a bobinei este dată, aproximativ, de relația:

$$L[\mu H]\approx\frac{0{,}3937r^2n^2}{9r+10l}$$

($=L_0$ — inductanța bobinei monostrat).

Valorile L maxime ce se pot obține cu astfel de bobine nu depășesc 300 μH.

Bobinajele *monostrat* prezintă rezistențe de curent continuu, inductivități și capacități parazite reduse. Ele pot fi atît cilindrice, cît și toroidale sau „în dublu D". În primul caz, cuplajele magnetice parazite sînt importante (perturbînd funcționarea altor componente și modificînd inductivitatea proprie), dar în celelalte cazuri cîmpul magnetic de dispersie este mult mai redus. Bobinele monostrat realizate cu spire distanțate (conductorul putînd fi neizolat în acest caz), au un factor de calitate Q ridicat (150 ... 400) și sînt deosebit de stabile. Bobinele monostrat asigură inductanțe de pînă la 200 ... 300 μH, pentru valori mai mari fiind necesare bobinele multistrat.

Un alt tip constructiv de bobină fără miez magnetic (fig. 3.2) — permițînd obținerea unor inductivități mari în volum mic — conține mai multe straturi de sîrmă, suprapuse și avînd — fiecare — spirele bobinate una lîngă alta.

Conductorul utilizat trebuie să fie în acest caz — în mod obligatoriu — izolat (cu email, uneori și cu mătase).

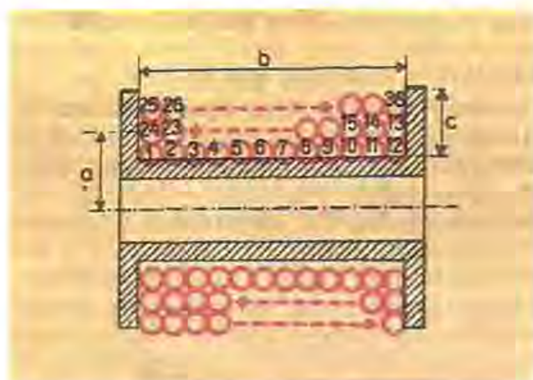


Fig. 3.2. Bobină cilindrică multistrat (pe carcasă cu flanșe).

Carcasa — în general tubulară — este prevăzută la extremități cu flanșe pentru evitarea alunecării spirelor bobinate. Ordinea bobinării spirelor și straturilor este indicată prin numerele 1 ... 36 (pentru exemplul din figură).

Dacă a, b, c (în cm) sînt dimensiunile geometrice menționate, iar n=numărul spirelor bobinate (în total), inductivitatea L a bobinei este dată de relațiile:

$$L[\mu H]=\frac{0{,}315a^2n^2}{6a+9b+10c}$$

— pentru bobine scurte (la care $a\approx b\approx c$)

$$L[\mu H]=L_0-\frac{0{,}0127n^2ac}{b}(0{,}693+B)$$

— pentru bobine lungi (la care $a=b=c$)

S-au notat:

L_0=inductanța bobinei monostrat (cu aceiași r, l, n)

σ = factor de corecție (0 . . . 0,32), dat în grafice în funcție de raportul b/c [15].

Bobinajele *multistrat* spiră lîngă spiră se caracterizează prin capacitate distribuită mare și pericol de străpungere a izolației (în cazul spirelor de la extremitatea straturilor, acolo unde diferențele de potențial pot fi relativ mari). Pentru reducerea pericolului de străpungere se pot introduce, între straturi, folii izolatoare (din material plastic, hîrtie de condensator etc.) — deși, astfel, se obține și o creștere a volumului bobinajului.

Alte soluții pentru evitarea străpungerilor, dar și pentru reducerea capacităților proprii (parazite) constau în realizarea bobinajelor de tip:

- cilindric secționat (v. fig. 3.4);
- piramidal (recomandabil pentru obținerea inductanțelor mari, lucrînd la tensiuni ridicate — de ex. în cazul transformatoarelor de impulsuri);
- „fagure" („propriu-zis" — cu spire distanțate sau „universal" — cu spire nedistanțate), cu sau fără secțiuni.

Toate aceste bobinaje se realizează pe carcase cilindrice, dar se pot executa și bobinaje toroidale multistrat — alunecarea straturilor evitîndu-se prin introducerea unor folii izolatoare între straturi.

Bobinajele multistrat se pot realiza și fără carcasă, atunci cînd bobina trebuie să aibă un anumit profil (de ex. în cazul bobinelor de deflexie ale tubului cinescop) sau atunci cînd pierderile în carcasă devin importante.

Pentru a obține inductivități de valori mari, se introduce un miez magnetic în interiorul carcasei bobinei, avînd rolul de-a concentra, aproape integral, liniile cîmpului magnetic.

O asemenea bobină, frecvent utilizată în domeniul frecvențelor foarte înalte este prezentată în fig. 3.3. Carcasa tubulară (filetată interior) conține un miez cilindric din ferită, montat pe un suport din material plastic (filetat exterior). Prin înșurubarea /deșurubarea acestui suport (cu ajutorul unei șurubelnițe speciale din material nemagnetic — de exemplu plastic) se poate modifica poziția miezului în raport cu bobinajul, reglînd astfel valoarea inductivității L (într-un domeniu de valori relativ redus). În varianta multistrat se obțin, evident, valori superioare de inductivități L.

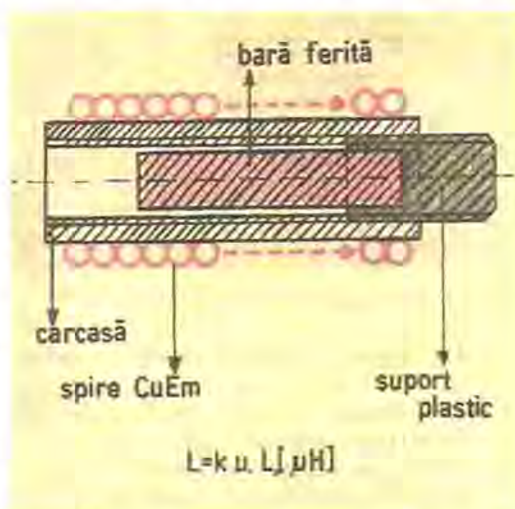


Fig. 3.3. Bobină cilindrică, monostrat, cu miez din ferită.

Notînd:

L_0 = inductivitatea bobinei monostrat, fără miez

μ_r = permeabilitatea magnetică, relativă a miezului

k = constantă (depinzînd de dimensiunile bobinei și ale miezului precum și de poziția relativă a acestora),

valoarea inductivității L este dată de relația

$$L\,[\mu H] = k\dot{\mu}_r L_0\,[\mu H]$$

Majoritatea bobinelor utilizate în echipamentele electronice au în componența lor un miez magnetic care, din punct de vedere constructiv, poate fi: secționat (deschis sau neînchis) — de obicei de formă cilindrică ori tubulară — sau închis — în general de formă toroidală.

Miezurile se realizează din materiale feromagnetice moi — fie sub formă de laminate (ca tole sau benzi din aliaje Fe-Si, Fe-Ni etc.), fie ca pulbere (intrînd în structura materialelor magnetodielectrice sau magnetoceramice — „feritele").

Construcția miezurilor permite, în general, modificarea inductanței prin deplasarea miezului în raport cu înfășurarea (bobinajul).

Există și miezuri nemagnetice realizate din alamă sau cupru.

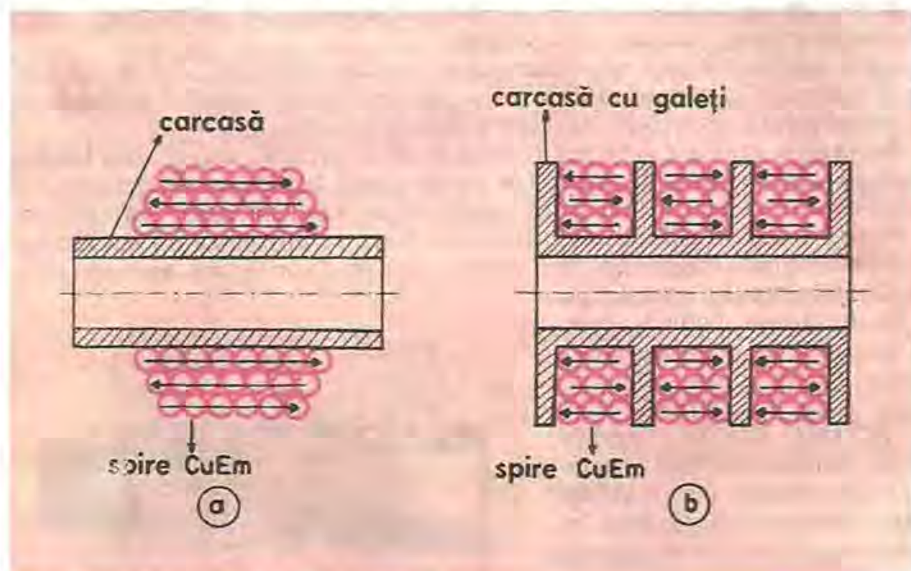


Fig. 3.4. Alte tipuri de bobine/bobinaje.

Pe lîngă tipurile de bobine și bobinaje prezentate mai sus, se pot realiza (cu sau fără miez magnetic) și alte tipuri, ca de ex.:

a) bobinaj cilindric pe carcasă fără flanșe (fig. 3.4 *a*).

Pentru ca spirele marginale să nu alunece este necesar ca stratul *n* să conțină cu cel puțin o spiră mai puțin decît stratul $n-1$.

b) bobinaj cilindric secționat cu flanșe intermediare (fig. 3.4 *b*). Carcasa este prevăzută în acest caz cu mai multe flanșe (galeți) delimitînd secțiunile bobinei. Numărul spirelor din fiecare astfel de secțiune fiind redus, scade capacitatea proprie (parazită). În plus, întrucît spirele între care există diferențe mari de potențial sînt îndepărtate, se evită complet străpungerile electrice.

În ambele cazuri, săgețile din figuri indică sensul de efectuare a bobinării.

O bobină plată, realizată cu ajutorul tehnologiei cablajelor imprimate sub forma unei spirale (circulare sau dreptunghiulare) este o bobină imprimată (fig. 3.5). Se pot obţine astfel inductivităţi relativ mici (0,1 . . . 10 μH) şi factori de calitate între 50 . . . 200 (depinzînd de calitatea suportului electroizolant şi de rezistivitatea conductorului plan).

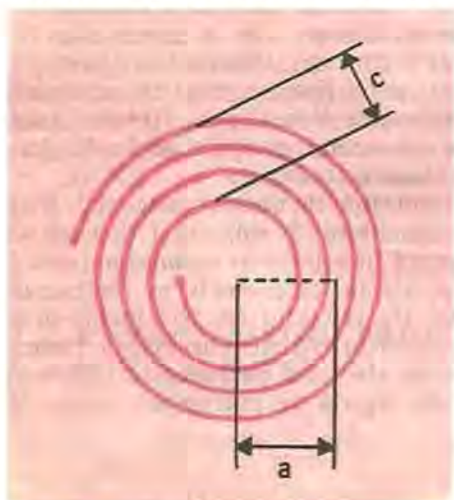


Fig. 3.5. Bobină imprimată (plată).

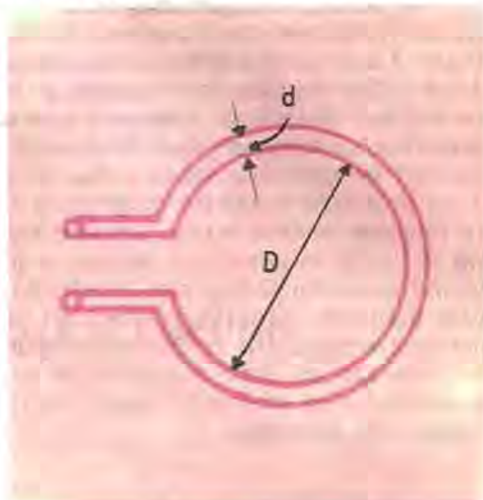


Fig. 3.6. Bobină monospiră fara carcasă.

Notînd (pentru bobina spirală circulară):

a [cm] = raza medie

c [cm] = lăţimea spiralei

inductivitatea L a bobinei se poate calcula cu relaţia: $L[\mu H] = \frac{a^2 n^2}{20a + 28c}$

În domeniul frecvenţelor foarte înalte (FIF/UIF) se utilizează bobine fără carcasă, realizate din conductor relativ gros ($d \geqslant 1$ mm, în general neizolat) şi avînd una (fig. 3.6) sau mai multe spire.

În primul caz, cu condiţia ca diametrul D al spirei să fie mai mare decît lungimea de undă corespunzătoare semnalului aplicat şi cunoscînd d, D (în centimetri), valoarea inductanţei se poate calcula cu relaţia aproximativă:

$$L[\mu H] = 0{,}00628D \left(2{,}3 \lg \frac{8D}{d} - 2\right)$$

Inductivitatea bobinelor fără carcasă („cu aer") avînd $n = 1 \dots 10$ spire se poate determina şi din tabele (în funcţie de diametrul interior, diametrul conductorului şi numărul de spire) — de exemplu din lucrarea [10].

3.4. ECRANAREA BOBINELOR

Prin structura şi funcţionarea sa, orice bobină se poate cupla inductiv (prin cîmp magnetic) sau capacitiv (prin cîmp electric) cu diferite generatoare /receptoare exterioare de semnal parazit.

Pentru reducerea (sau chiar anularea) acestor cuplaje potenţiale şi nedorite, bobinele sînt protejate cu ajutorul unor ecrane magnetice (respectiv electrice) special construite şi în general, conectate la masă. Materialul şi forma acestor ecrane se aleg în funcţie atît de rolul acestora cît şi de frecvenţa cîmpului magnetic (electric) perturbator. Astfel:

— pentru ecranare magnetică în joasă frecvenţă (JF) se utilizează materiale feromagnetice cu permeabilitate relativă mare (de ex. „permalloy"). Plasînd bobina în interiorul unui ecran de formă paralelipipedică sau cilindrică (fără contact între acesta şi miez), se obţine un efect de ecranare cu atît mai eficient cu cît ecranul este mai departe de miez şi cu cît reluctanţa materialului ecranului este mai mică (în consecinţă, peretele ecranului trebuie să fie gros sau subţire, dar cu mai multe straturi);

— pentru ecranare magnetică la frecvenţe medii şi înalte (FI, RF) se folosesc materiale conductoare cu conductibilitate ridicată (Al, Cu) — fig. 3.7 *a*. Şi în acest caz, bobina se plasează în interiorul ecranului (avînd formă paralelipipedică sau cilindrică), dar efectul de protecţie se realizează prin acţiunea curenţilor turbionari induşi (în circuitul electric închis prin peretele ecranului) de cîmpul magnetic exterior. Aceşti curenţi, la rîndul lor, creează un cîmp magnetic ce se opune efectului perturbator. Întrucît aluminiul este mai ieftin decît cuprul, de regulă se realizează astfel de ecrane din aluminiu;

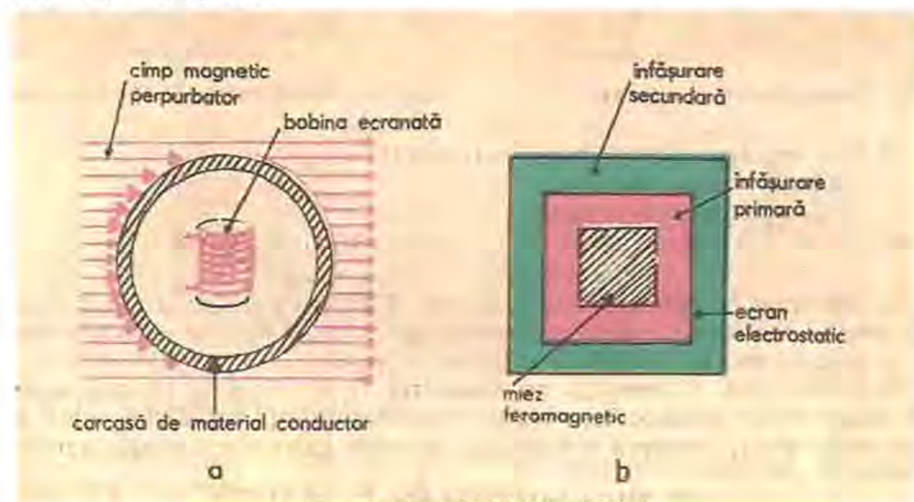


Fig. 3.7. Ecranarea bobinelor.

— pentru ecranarea electrostatică la joasă frecvenţă — de ex. în cazul transformatoarelor — se poate reduce efectul capacităţilor parazite dintre primar şi secundar introducînd între aceste înfăşurări o folie conductivă separatoare, conectată galvanic la potenţial nul (fig. 3.7 *b*). Ecranul electrostatic astfel obţinut nu trebuie să se închidă pentru a nu forma o spiră în scurtcircuit.

De menţionat că orice ecran magnetic complet închis şi realizat din material electroconductiv este şi un ecran electrostatic (obţinîndu-se „cuşca Faraday").

Efectul de ecranare este măsurat prin raportul dintre intensitățile cîmpului electric/magnetic (în exteriorul bobinei) în prezența, respectiv în absența ecranului. Valori uzuale de ordinul 1/100 ... 1/20 semnifică o ecranare suficient de eficientă, în majoritatea cazurilor. Pentru creșterea efectului ecranării, în practică se utilizează uneori două sau chiar trei ecrane pentru o aceeași bobină.

De remarcat că, totodată, ecranul influențează parametrii bobinei, cu atît mai puternic cu cît pereții acestuia sînt situați mai aproape de bobină. Plasînd un cilindru din ferită între ecran și bobină se reduce mult cîmpul magnetic exterior al bobinei (deci și cuplajul acesteia cu ecranul) devenind astfel posibilă micșorarea dimensiunilor de gabarit ale bobinei avînd ecran.

Stabilitatea bobinelor ecranate este inferioară celei a bobinelor neecranate, deoarece factorii de influență (timpul, temperatura, umiditatea etc.) acționează și asupra dimensiunilor geometrice și parametrilor electrici ai ecranului.

3.5. CARACTERISTICI PRINCIPALE ȘI CIRCUITE ECHIVALENTE

Cei mai importanți parametri caracteristici ai unei bobine reale, cu pierderi, sînt:

— inductivitatea (inductanța) L [H] — definită ca un raport între fluxul magnetic propriu Φ și curentul I care parcurge bobina ($L=\Phi/I$). Acest parametru depinde de: forma, dimensiunile, numărul de spire al bobinei precum și de permeabilitatea relativă a mediului (miezului) și de temperatura de lucru. El caracterizează o bobină ideală și are valori uzuale (în radioelectronică) de ordinul nH ... H;

— rezistența totală de pierderi R [Ω] (sau r [Ω]) — determinată atît de pierderile în conductor (prin efect Joule — în cc./c.a. — și efect pelicular — în c.a.) cît și de pierderile în materialul magnetic (prin curenți turbionari și prin histerezis) și de rezistența de izolație. Acest parametru depinde în mod esențial de frecvența de lucru (fiind mai mare la frecvențe înalte). De remarcat că inductivitatea L caracterizează comportamentul util al bobinei ca element reactiv, în timp ce rezistența de pierderi R caracterizează pierderile de putere activă în bobină;

— factorul de calitate Q [—] — definit la o anumită frecvență de lucru ca raportul dintre energia maximă existentă în cîmpul magnetic al bobinei și energia disipată (de aceasta) sub formă de căldură într-o perioadă. Bobinele utilizate în echipamentele radioelectronice au, în general, $Q=0\ldots300$;

— capacitatea (parazită) proprie, C_p [pF] — determinată de suma capacităților distribuite între spirele bobinei precum și dintre acestea și masă. Acest parametru depinde în mod esențial de dimensiunile și numărul de spire al bobinei, avînd valori de ordinul pF ... sute pF;

— stabilitatea (parametrilor bobinei) — definită prin variația parametrilor de mai sus în funcție de timp („îmbătrînirea") sau sub influența temperaturii, umidității, vibrațiilor etc.;

— puterea, tensiunea și curentul maxim admise pentru a nu produce transformări ireversibile în bobină.

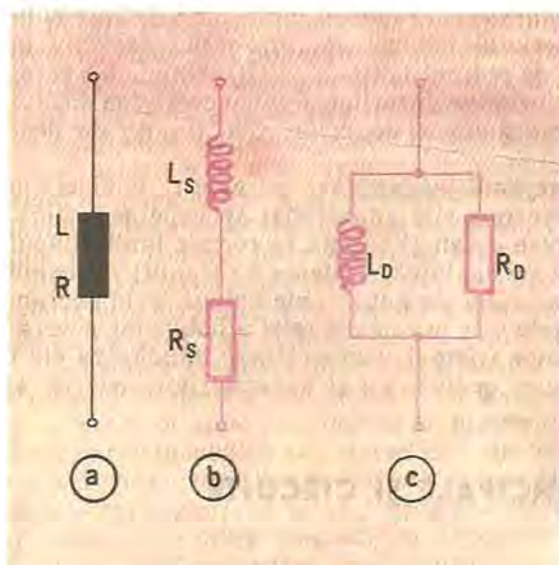


Fig. 3.8. Circuite echivalente ale bobinei reale.

Orice bobină reală (fig. 3.8 *a*) poate admite două tipuri de circuite echivalente:

● circuitul echivalent — serie (L_S, R_S) — fig. 3.8 *b*

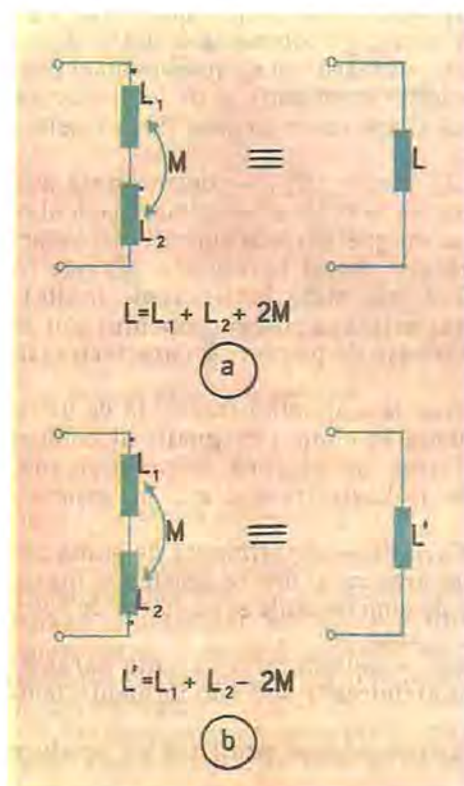
● circuitul echivalent — paralel (L_D, R_D) — fig. 3.8 *c*

Se demonstrează că:

$$L_D = \frac{R_S^2 + \omega^2 L_S^2}{\omega^2 L_S}$$

$$R_D = \frac{R_S^2 + \omega^2 L_S^2}{R_S}$$

$$Q = \frac{\omega L_S}{R_S} = \frac{R_D}{\omega L_D}$$



Prin conectarea în serie a două înfăşurări — avînd inductivităţile L_1 şi L_2 — se obţine o bobină cu inductanţa echivalentă $L = L_1 + L_2$ (dacă cele două înfăşurări nu sînt cuplate prin cîmp magnetic).

În cazul existenţei unui cuplaj magnetic între bobinele conectate în serie, inductanţa echivalentă este:

$L = L_1 + L_2 + 2M$ — dacă bobinele au acelaşi sens (fig. 3.9 *a*)

$L' = L_1 + L_2 - 2M$ — dacă bobinele au sensuri opuse (fig. 3.9 *b*)

Sensul unei bobine se referă la curentul electric ce o parcurge, deci la fluxul magnetic obţinut. De regulă, se indică pe schemele cu inductanţe cuplate magnetic, printr-un asterisc (*), punctul de începere a înfăşurărilor (prin care intră curentul electric).

Fig. 3.9. Circuitul echivalent al unei bobine cu două înfăşurări conectate în serie şi cuplate magnetic.

S-au notat: $M=k\sqrt{L_1L_2}$ — inductanța mutuală (sau de cuplaj) a înfășurărilor L_1 și L_2

k $(=0 \ldots 1)$ — coeficient de cuplaj al bobinelor depinzînd de geometria și poziția relativă a celor două înfășurări)

Pentru două bobine cuplate magnetic, inductanța mutuală M este, prin convenție, pozitivă — dacă bobinele implicate au același sens și negativă — în caz contrar (v. fig. 3.9).

Un caz particular al situației precedente îl reprezintă circuitul din fig. 3.10, la care punctul median al înfășurărilor (de obicei o „priză") constituie borna de intrare *1* (borna *2* avînd rol de ieșire). Întrucît înfășurările L_1 și L_2 sînt și cuplate magnetic (prin inductanța mutuală M), cuadripolul funcționează ca un transformator.

De remarcat că, în general, impedanța de ieșire a generatorului (conectat la bornele *1—1'*) fiind mare, inductanța echivalentă ($-M$) se poate neglija.

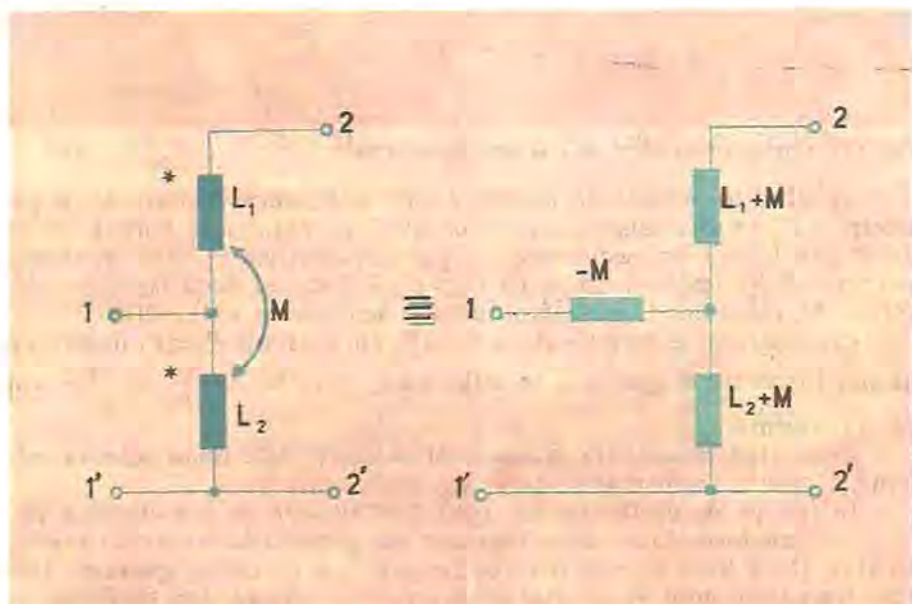


Fig. 3.10. Circuitul echivalent al unei bobine (cu două înfășurări înseriate și cuplate magnetic) avînd intrarea pe priză.

3.6. APLICAȚII ALE BOBINELOR

3.6.1. TRANSFORMATORUL

Două sau mai multe bobine cuplate — amplasate pe același miez magnetic — formează un transformator.

În varianta sa cea mai simplă (fig. 3.11), el conține 2 bobine L_1, L_2 — independente și cuplate exclusiv prin cîmp magnetic.

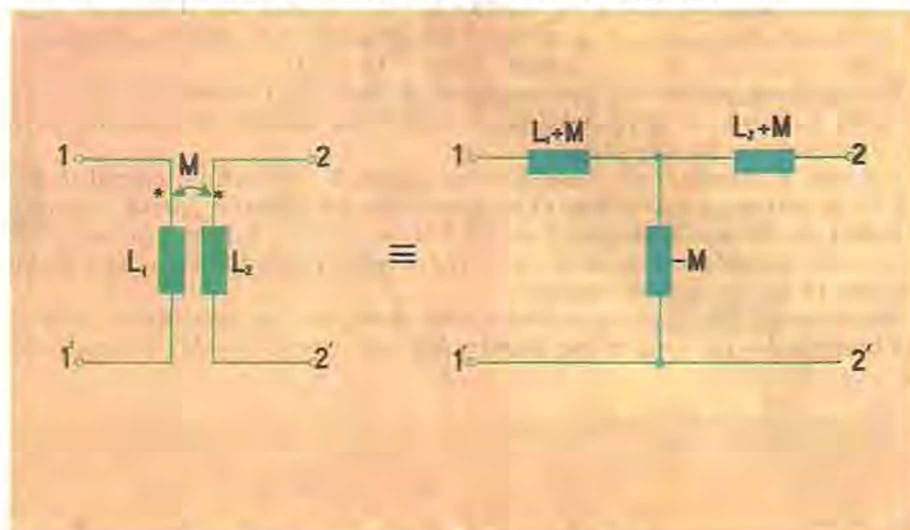


Fig. 3.11. Circuitul echivalent în T al unui transformator.

Aplicînd la bornele de intrare *1—1'*, înfășurării primare L_1, o putere electrică P_1 (sub tensiunea U_1 și curentul I_1), rezultă la bornele de ieșire *2—2'* (ale înfășurării secundare L_2) puterea electrică P_2 (sub tensiunea U_2 și curentul I_2), astfel încît, dacă $U_2>U_1 \rightarrow I_2<I_1$ și dacă $U_2<U_1 \rightarrow I_2>I_1$. (Obs.: U, respectiv I, sînt amplitudinile semnalelor $u(t)$, $i(t)$).

Considerînd, în mod ideal, că $P_1=P_2$ (în realitate $P_2<P_1$ datorită pierderilor în miezul magnetic și în înfășurări), rezultă: $n=\frac{U_2}{U_1}=\frac{I_1}{I_2}=$ raport de transformare.

Cunoscînd inductanța mutuală M se poate determina schema echivalentă a unui transformator, ca în fig. 3.11.

În funcție de destinația lor, transformatoarele se pot clasifica în:

— transformatoare *de alimentare* (în general la frecvența rețelei, de 50 Hz). Dacă între primar și secundar există și un cuplaj galvanic (asigurînd transferul unor puteri mai importante) — cu sau fără posibilitatea reglării tensiunii de ieșire — este vorba de un „autotransformator".

— transformatoare *de semnal* (de audiofrecvență sau de radiofrecvență, cu sau, respectiv, fără miez magnetic). Ele se utilizează pentru adaptarea impedanțelor sau nivelelor de tensiune/curent, pentru cuplarea etajelor de amplificare, pentru izolarea galvanică (în c.c.) a unor circuite etc.

Transformatoarele reprezintă — alături de bobinele de șoc — cele mai voluminoase și mai grele componente din structura echipamentelor electronice. Astfel, ele pot reprezenta pînă la 20% din volumul și pînă la 40% din masa unui astfel de echipament [14].

În practică se utilizează, în principal, transformatoare avînd structură și performanțe standardizate/normalizate — dar și unele tipuri special proiectate.

3.6.2. CIRCUITUL RLC SERIE

Conectînd în serie o bobină reală L (avînd rezistența de pierderi r_L) și un condensator real C (cu rezistența de pierderi r_C) la bornele unui generator de tensiune E_g (de frecvență f și rezistență internă R_g), rezultă circuitul echivalent RLC serie din fig. 3.12.

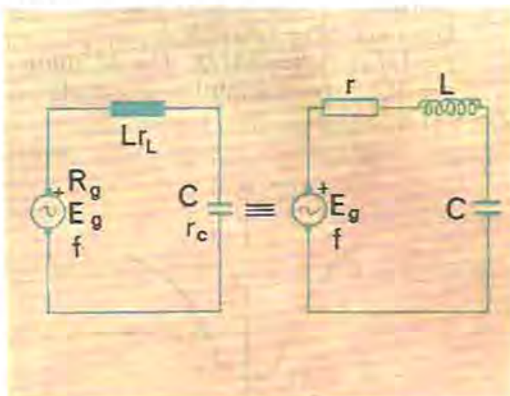


Fig. 3.12. Circuite LC și RLC serie.

S-au notat:

$r=r_L+r_C+R_g$=rezistența totală de pierderi

$f_0=1/2\pi\sqrt{LC}$=frecvența de rezonanță

$Q_0=\omega_0L/r=1/\omega_0Cr$= factorul de calitate

Reprezentînd grafic, în funcție de frecvența f, variațiile reactanțelor:

— bobinei: $X_L=\omega L$ (fig. 3.13 a)

— condensatorului:

$X_C=-\dfrac{1}{\omega C}$ (fig. 3.13 b)

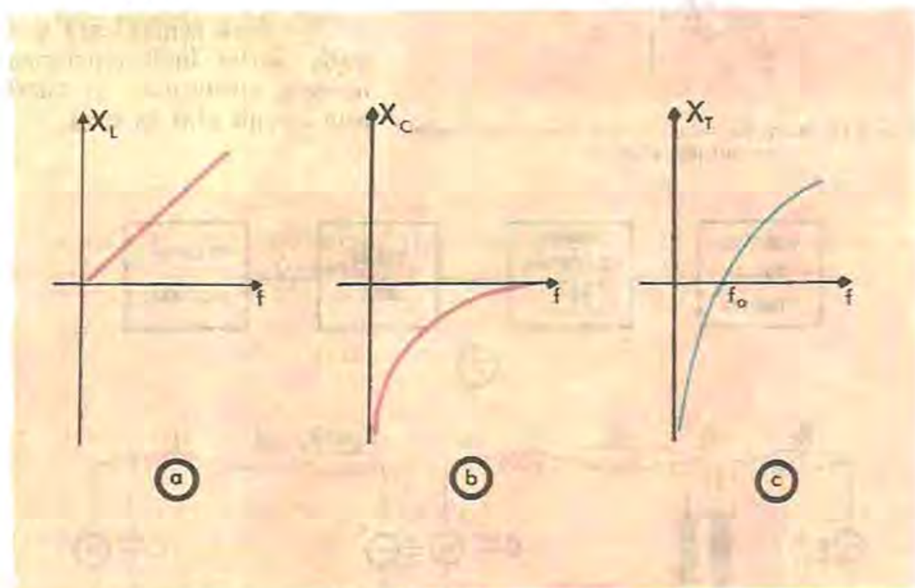


Fig. 3.13. Variația reactanțelor X_L, X_C, X_T, cu frecvența f.

— circuitului echivalent serie: $X_T=\omega L-\dfrac{1}{\omega C}$ (fig. 3.13 c),

se observă că reactanța totală X_t se anulează la frecvența f_0, pentru $\omega^2=1/LC=\omega_0^2=(2\pi f_0)^2$, adică atunci cînd frecvența semnalului

($\omega=2\pi f$) coincide cu frecvenţa proprie a circuitului ($\omega_0=2\pi f_0$) numită şi „frecvenţa oscilaţiilor libere din circuit" sau „frecvenţa de rezonanţă a circuitului".

Impedanţa echivalentă a unui circuit RLC serie este (în complex):

$$Z=Z(j\omega)=R+j\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)=\sqrt{R^2+X^2}e^{j\varphi}=|Z|\perp\varphi$$

Notînd:

$Q_0=\omega_0 L/R=1/\omega_0 CR$

$\beta=f/f_0-f_0/f\approx 2\Delta f/f_0$ (la Δf mic)

$x=\beta Q_0$ (=variabilă normată, „dezacord generalizat"), rezultă $Z=R(1+jx)$

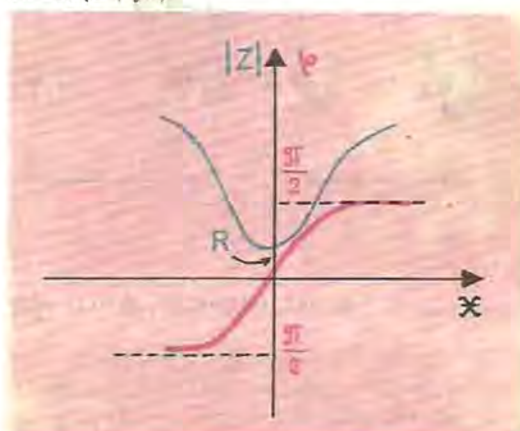


Fig. 3.14. Variaţia modulului şi fazei impedanţei circuitului RLC serie.

Reprezentînd, în funcţie de variabila x, modulul $|Z|$ şi faza φ determinînd impedanţa Z, rezultă curbele din fig. 3.14. Se observă că la rezonanţă ($f=f_0$; $\beta=0$):

— impedanţa echivalentă $|Z|$ are un caracter pur rezistiv ($X=0$; $|Z|=R$) şi este minimă; în consecinţă curentul prin circuit este, în acest caz, maxim;

— faza echivalentă φ este nulă, astfel încît tensiunea la bornele circuitului şi curentul prin circuit sînt în fază.

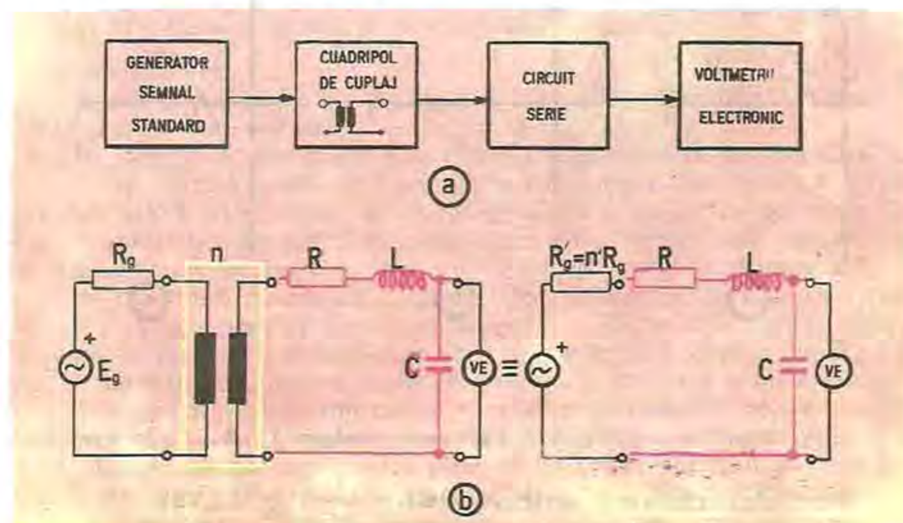


Fig. 3.15. Schema montajului experimental pentru ridicarea caracteristicilor circuitului RLC serie: *a*) schemă bloc; *b*) scheme electrice.

Comportarea remarcabilă a circuitului RLC-serie în jurul frecvenței de rezonanță f_0 face ca — în aplicații — acesta să lucreze numai la frecvențe $f \approx f_0$.

Pentru determinarea experimentală și studierea caracteristicilor unui circuit RLC serie se utilizează configurația de măsură avînd schema bloc din fig. 3.15 *a*.

Generatorul de semnal standard *GSS* furnizează semnale de radiofrecvență (avînd frecvența *f* și amplitudinea E_g necesare). Cuadripolul de cuplaj este un transformator intercalat între generator și circuitul RLC-serie cu scopul de-a reduce influența rezistenței interne (de ieșire) R_g a generatorului asupra circuitului RLC serie măsurat. Transformînd schema echivalentă din fig. 3.15 *b* se observă că rezistența internă R_g devine $R_g' = n^2 R_g$ — unde n = raportul de transformare al cuadripolului de cuplaj ($n < 1$).

Voltmetrul electronic *VE* permite măsurarea tensiunilor de RF din circuit (de ex. pe condensatorul *C*).

În fig. 3.16 sînt prezentate principalele caracteristici ce pot fi determinate cu ajutorul schemei din fig. 3.15:

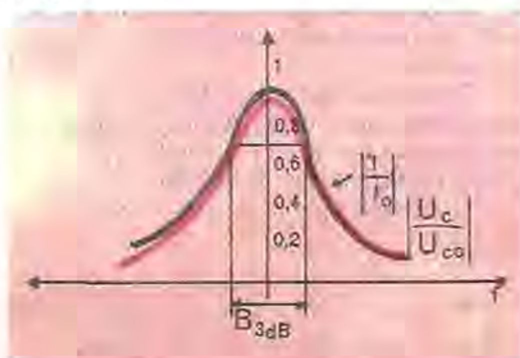


Fig. 3.16. Caracteristicile de selectivitate ale circuitului RLC serie.

— variațiile curentului normat $|I/I_0|$ prin circuit și ale tensiunii normate $|U_c/U_{c0}|$ (la bornele condensatorului *C*) — în funcție de frecvența *f*.

S-au notat:

$I = E_g/Z$ = curentul prin circuitul RLC serie

$I_0 = E_g/R_t$ = curentul la rezonanță (valoare maximă)

$R_t = R_g' + R$ = rezistența totală (v. fig. 3.15)

$U_c = (1/j\omega C)(E_g/Z)$ = tensiunea la bornele condensatorului

$B_{3dB} = f_0/Q$ = banda (de trecere) la 3 dB a circuitului

Prin convenție și definiție banda la 3 dB este determinată de scăderea la $1/\sqrt{2} = 0{,}707$ din valoarea sa maximă a curentului normat $|I/I_0|$ (ceea ce corespunde înjumătățirii puterii din circuit, la extremitățile acestei benzi). Cu alte cuvinte, banda la 3 dB reprezintă un ecart de frecvență (în jurul frecvenței de rezonanță) la extremitățile căruia atenuarea semnalului este de 3 dB ($\sqrt{2}$ ori).

Din simetria geometrică a caracteristicii de selectivitate ($|I/I_0|$ în funcție de *f*) rezultă că banda reală la 3 dB (B_{-3dB}) este riguros egală cu raportul dintre frecvența de rezonanță (f_0) și factorul de calitate al circuitului (Q). În consecință, un circuit este cu atît mai selectiv cu cît factorul său de calitate este mai mare.

Se demonstrează că $|U_c/U_{c0}| = (\omega_0/\omega)\,(|I/I_0|)$; deci, în jurul frecvenței de rezonanță, caracteristica de selectivitate $|I/I_0|$ poate fi reprezentată, cu bună aproximație, de caracteristica $|U_c/U_{c0}|$ — ambele în funcție de frecvența f. Îndepărtîndu-ne de rezonanță, circuitul RLC serie are un comportament capacitiv (la frecvențe mai joase) sau inductiv (la frecvențe mai înalte), în apropierea rezonanței fiind pur rezistiv.

Se demonstrează că, la rezonanță, tensiunile la bornele bobinei și ale condensatorului au valori maxime și egale ($U_L = U_c = QE_g$), fiind defazate (între ele — cu 180° și, față de U_R — cu 90°, înainte și, respectiv, înapoi) și de Q ori mai mari decît tensiunea aplicată de la generator, circuitului RLC serie. Din aceste considerente, rezonanța circuitului serie este o rezonanță *de tensiune*, iar factorul de calitate Q se mai numește și „factor de supratensiune". La proiectarea unui asemenea circuit este necesar să se țină seama de creșterea importantă — la rezonanță — a tensiunii la bornele elemetelor reactive.

Circuitele rezonante RLC serie pot fi utilizate pentru generarea unor oscilații neamortizate (întreținute), pierderile (datorate rezistenței totale R_t) fiind compensate prin conectarea periodică a circuitului rezonant (oscilant) la o sursă de t.e.m. capabilă să introducă în circuit energia echivalentă pierderilor.

Totodată, un circuit RLC serie se poate utiliza și pentru adaptarea de impedanță/rezistență. Astfel, de exemplu, circuitul RLC serie din fig. 3.17 realizează adaptarea rezistenței (reduse) de ieșire R_g a generatorului tensiunii E_g la rezistența de sarcină R_s (mare).

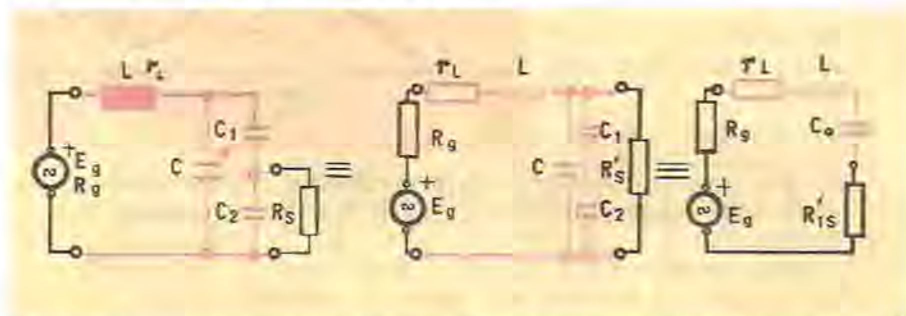


Fig. 3.17. Utilizarea circuitului RLC serie pentru adaptarea de impedanță/rezistență.

Prin transformarea succesivă a circuitului inițial (eliminarea prizei mediane și transformarea reactorului disipativ) rezultă condiția de adaptare (transfer maxim de putere): $R_g = R_L + R_{1s}$.

S-au notat:

$C_0 = C + \dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}$ = capacitatea echivalentă de acord

$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC_0}$ = frecvența de rezonanță

$R_s = p^2R_s$ = rezistență de sarcină echivalentă (după eliminarea prizei mediane)

$R_{1s} = p^2/\omega^2C_0^2R_s$ = rezistența de sarcină echivalentă serie

$p = C_1/(C_1+C_2)$ = factor de priză pe condensatoare

3.6.3. CIRCUITUL RLC DERIVAȚIE

Conectînd în paralel o bobină reală L (cu rezistența de pierderi r_L) și un condensator real C (cu rezistența de pierderi r_C) la bornele unui generator de curent I_g, rezultă circuitul RLC derivație (sau paralel) din fig. 3.18. În schema echivalentă, pierderile sînt concentrate în rezistența r, iar elementele reactive sînt considerate ideale. S-au notat:

$r=(r_L\, r_C)/(r_L+r_C)$ = rezistența totală de pierderi

$Z(\omega)=1\Big/\left(\frac{1}{r}+j\omega C+\frac{1}{j\omega L}\right)=r/(1+jx)$ = impedanța circuitului

$f_0=1/2\pi\sqrt{LC}$ = frecvența de rezonanță

$Q=r/\omega_0 L=\omega_0 Cr$ = factor de calitate

$x=\beta Q$ = variabila normată

Impedanța echivalentă a circuitului RLC derivație din fig. 3.18 rezultă astfel (presupunînd impedanțele ramurilor reactive de forma R_i+jX_i):

$$Z(j\omega)=\frac{(R_1+jX_1)(R_2+jX_2)}{R_1+R_2+j(X_1+X_2)}\approx\frac{-X_1X_2}{R_s+jX_s}=\frac{-X_1X_2}{R_s}\cdot\frac{1}{1+jx}=\frac{-R}{1+jx}$$

întrucît, în general, $R_1 \ll X_1$ și $R_2 \ll X_2$ și notînd:

$$R_s=R_1+R_2;\quad X_s=X_1+X_2;\quad x=X_s/R_s=\beta Q;$$

$$|Z(j\omega_0)|=R \text{ (impedanța la rezonanță)}.$$

Reprezentînd în funcție de variabila normată x, modulul $|Z|=$ $=R/\sqrt{1+x^2}$ și faza $\varphi=-\text{arctg}\, x$ ale impedanței Z, rezultă curbele din fig. 3.19.

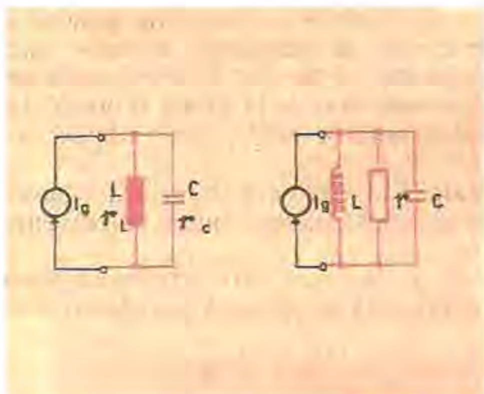


Fig. 3.18. Circuitul RLC derivație.

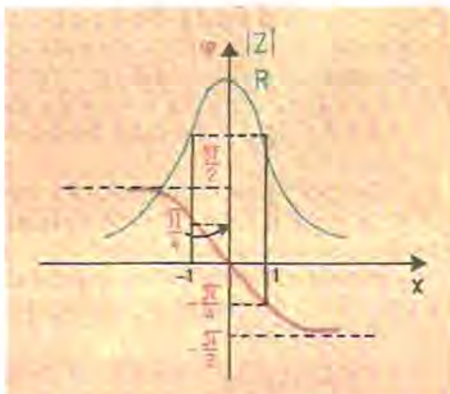


Fig. 3.19. Variația modulului și fazei impedanței circuitului RLC derivație.

Se observă că la rezonanță ($f=f_0$; $\beta=0$):

— impedanța echivalentă are un caracter pur rezistiv ($x=0$, $|Z|=R$) și este maximă; deci, în aceste condiții, curentul prin circuit este minim;

— faza echivalentă φ este nulă, astfel încît tensiunea la bornele circuitului și curentul prin circuit sînt în fază.

Reprezentînd grafic, în funcție de frecvența f (fig. 3.20), variațiile susceptanțelor:

În cazul circuitului RLC derivaţie funcţionînd la rezonanţă această condiţie implică satisfacerea relaţiei:

$$Z_g=Z(j\omega_0) \text{ unde } Z(j\omega_0)=\omega_0 LQ=\frac{1}{\omega_0 C}Q=\frac{L}{CR_s}=R$$

S-a notat: $R_s=R_1+R_2=r_L+r_C$, iar R=impedanţa pur rezistivă a circuitului RLC derivaţie, la rezonanţă.

În consecinţă, pentru obţinerea transferului maxim de putere este necesar ca generatorul semnalului aplicat circuitului oscilant să aibă o rezistenţă internă foarte mare ($Z_g=R$) — condiţie, în general, greu de realizat, mai ales în cazul circuitelor cu tranzistoare.

În scopul reducerii impedanţei de sarcină a generatorului de semnal se utilizează circuite RLC derivaţie, fie cu priză pe bobină, fie cu priză pe condensator. În acest caz, bobina (respectiv condensatorul) se divide în două componente L', L'' (respectiv C', C'') astfel încît $L=L'+L''$ (respectiv $C=C'+C''$).

Se definesc „factori (coeficienţi) de priză": pe bobină ($p=L'/L<1$) sau pe condensator ($p=C'/C<1$) obţinîndu-se astfel impedanţe (la rezonanţă) reduse în raportul p^2 (întrucît $Z'(j\omega_0)=p^2\frac{L}{CR_s}$).

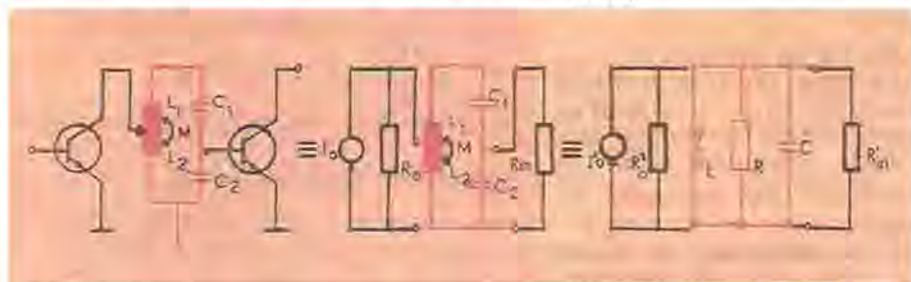


Fig. 3.23. Utilizarea circuitului RLC derivaţie pentru adaptarea de impedanţă.

Fig. 3.23 exemplifică utilizarea unui circuit RLC derivaţie pentru cuplarea a două etaje de amplificare (de RF, cu tranzistoare), în condiţiile transferului maxim de putere. Transformările echivalente succesive evidenţiază modul în care se obţine adaptarea de impedanţă.

S-au notat:

$p_1=\frac{L_1+M}{L_1+L_2+2M}=(L_1+M)/L$ = coeficientul de priză pe bobină

$p_2=C_1/(C_1+C_2)$ = coeficientul de priză pe condensator

$R_0'=R_0/p_1^2$ = rezistenţa echivalentă derivaţie a generatorului

$R_{in}'=R_{in}/p_2^2$ = rezistenţa echivalentă derivaţie de intrare în etajul următor

$I_0'=I_0 p_1$ = generatorul echivalent de curent

Reprezentînd variaţia tensiunii (la rezonanţă) U_{20} — de la bornele circuitului RLC derivaţie — în funcţie de coeficientul de priză p_1 se obţine curba din fig. 3.24 care admite un maxim pentru

$$p_1=p_{10}=\sqrt{\frac{R_0'(R+R_{in}')}{RR_{in}'}}$$

Valoarea p_{10} determină priza la care se realizează transferul maxim de putere.

Pentru cuplarea a două etaje amplificatoare de bandă îngustă, circuitul RLC derivație poate fi utilizat și conform schemelor din fig. 3.25:

— cuplarea colectorului tranzistorului din etajul precedent prin inductanță mutuală și a bazei tranzistorului din etajul următor prin priză capacitivă (fig. 3.25 *a*);

— cuplarea directă a colectorului tranzistorului din etajul precedent și — prin inductanță mutuală — a bazei tranzistorului din etajul următor (fig. 3.25 *b*).

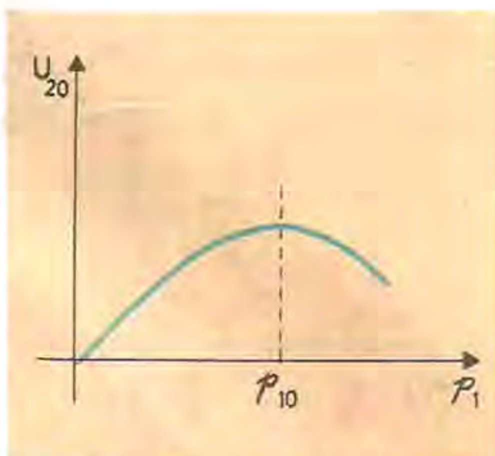


Fig. 3.24. Dependența tensiunii U_{20} de coeficientul de priză p_1.

3.6.4. CIRCUITE CUPLATE

Circuitele cuplate (oscilante) sînt constituite — în general — din două circuite (oscilante) de tip serie sau derivație între care se stabilește un transfer de energie, prin intermediul unui cuplaj (inductiv, capacitiv, rezistiv sau mixt).

Circuitul cuplat de intrare (la care se aplică semnalul de la un generator) se numește circuit primar, iar circuitul cuplat de ieșire (la care se conectează impedanța de sarcină) este circuitul secundar.

În funcție de impedanța Z_g (rezistența R_g) internă (de ieșire) a generatorului, aceasta se conectează fie în serie (la Z_g sau R_g mici — generator de tensiune), fie în paralel (la Z_g sau R_g mari — generator de curent) cu circuitul primar.

Structurile cele mai frecvent utilizate de circuite cuplate și cuadripolii de cuplaj corespunzători sînt prezentați în fig. 3.26.

a) circuite RLC serie cuplate (inductiv) prin inductanța mutuală *M*.

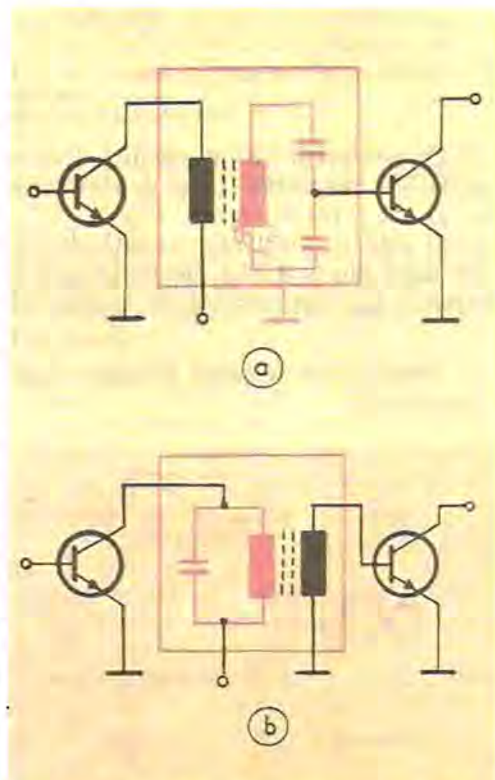


Fig. 3.25. Variante de utilizare a circuitului RLC derivație pentru cuplarea a 2 etaje de amplificare.

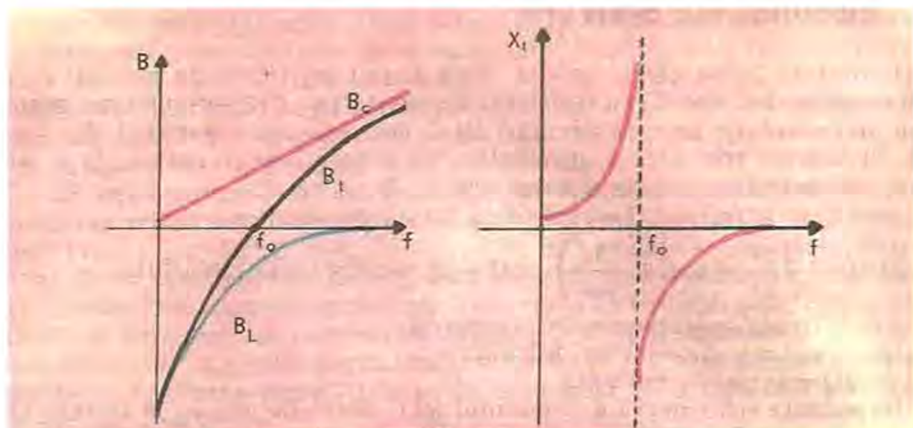


Fig. 3. 20. Variația susceptanțelor B_L, B_C, B_t și a reactanței echivalente X_t ale circuitului RLC derivație.

— bobinei: $B_L = -\frac{1}{\omega L}$

— condensatorului: $B_C = \omega C$

— circuitului echivalent derivație $B_t = B_L + B_C = \omega C - \frac{1}{\omega L}$

și variația reactanței echivalente $X_t = \frac{-1}{B_t} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$, se observă că susceptanța totală B_t se anulează la frecvența f_0, pentru $\omega^2 = \frac{1}{LC} = \omega_0 = (2\pi f_0)^2$, adică atunci cînd frecvența semnalului ($\omega = 2\pi f$) coincide cu frecvența proprie a circuitului ($\omega_0 = 2\pi f_0$) — numită și „frecvența de rezonanță derivație" sau „frecvența de antirezonanță" a circuitului RLC derivație. Spre diferență de circuitul RLC serie, la frecvența de rezonanță reactanța totală echivalentă a circuitului RLC derivație tinde asimptotic spre infinit (practic admite valori maxime).

Comportarea remarcabilă a circuitului RLC derivație în jurul frecvenței de rezonanță f_0 face ca — în aplicații — acesta să lucreze numai la frecvențe $f = f_0$.

Pentru determinarea experimentală și studierea caracteristicilor unui circuit RLC derivație se utilizează configurația de măsură avînd schema-bloc din fig. 3.21.

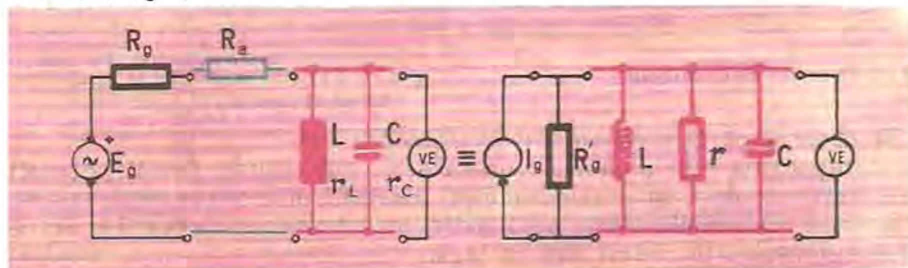


Fig. 3.21. Schema montajului experimental pentru ridicarea caracteristicilor circuitului RLC derivație.

Generatorul de tensiune (furnizînd tensiunea E_g și avînd rezistența internă R_g) este transformat în generator de curent (generînd curentul I_g și avînd rezistența internă R_g') cu ajutorul rezistenței adiționale serie R_a. Curentul generatorului de curent echivalent se determină cu relația: $I_g \approx E_g/(R_g+R_a)$.

Notînd $r=(r_L r_C)/(r_L+r_C)$=rezistența totală de pierderi a circuitului, condiția ca generatorul să nu afecteze circuitul măsurat este: $R_g+R_a \gg r$.

Voltmetrul electronic *VE* măsoară tensiunile la bornele circuitului RLC derivație.

În fig. 3.22 este prezentată variația în modul a tensiunii normate $|U_2/U_{20}|$ la bornele circuitului RLC derivație în funcție de frecvența f.

S-au notat:

$U_2=ZI_g$=tensiunea pe circuitul RLC derivație

$U_{20}=RI_g$=tensiunea pe circuit la frecvența de rezonanță

$B_{-3dB}=f_0/Q$=banda (de trecere) la 3 dB a circuitului.

Presupunînd curentul injectat I_g constant, caracteristica de selectivitate pentru tensiune (fig. 3.22) este asemănătoare variației modulului impedanței circuitului RLC derivație (fig. 3.19). La rezonanță, tensiunea la bornele acestui circuit are o valoare maximă.

Analog cu circuitul RLC serie, și în acest caz se poate defini o bandă (de trecere) la 3 dB ca diferența dintre frecvențele pentru care tensiunea scade la $1/\sqrt{2}=0{,}707$ din valoarea sa maximă.

Între lărgimea de bandă B_{-3dB}, frecvența de rezonanță f_0 și factorul de calitate Q al circuitului există aceeași relație ca la circuitul serie ($B_{-3dB}=f_0/Q$). Astfel, circuitul derivație va fi — ca și circuitul serie — cu atît mai selectiv cu cît factorul său de calitate Q are o valoare mai mare.

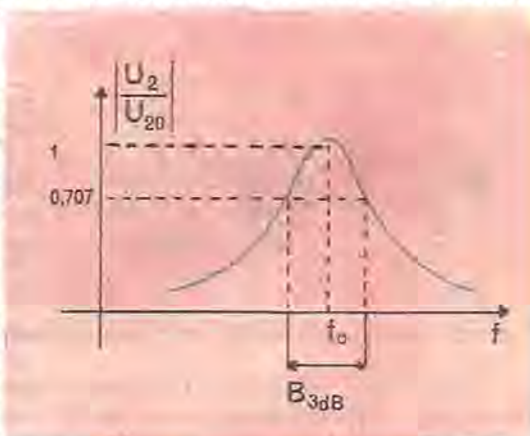


Fig. 3.22. Caracteristica de selectivitate a circuitului RLC derivație.

Se demonstrează că, la rezonanță, curenții prin cele două ramuri ale circuitului derivație sînt egali în modul și de Q ori mai mari decît curentul total absorbit. În consecință, la circuitul RLC derivație, apare o *rezonanță de curent* (spre deosebire de circuitul serie, cu *rezonanță de tensiune*).

Îndepărtîndu-ne de frecvența de rezonanță, circuitul RLC derivație are un comportament inductiv (la frecvențe mai joase) sau capacitiv (la frecvențe mai înalte) — deci invers ca la circuitul RLC serie. Dar la frecvența de rezonanță, ca și în cazul circuitului serie, impedanța echivalentă a circuitului RLC derivație este pur rezistivă.

Pentru realizarea unui transfer maxim de putere de la sursa de semnal (E_g sau I_g) către circuitul oscilant, este necesar să se realizeze adaptarea impedanței interne a generatorului (Z_g) la impedanța circuitului oscilant $Z(j\omega)$.

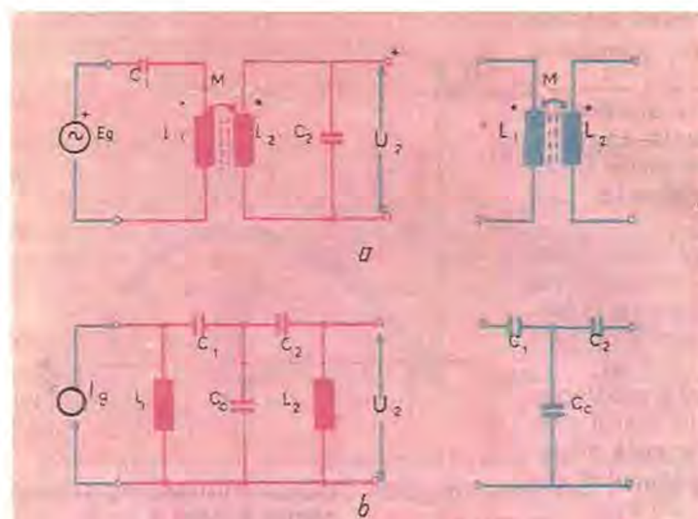


Fig. 3.26. Tipuri fundamentale de circuite oscilante cuplate.

Coeficientul de cuplaj este: $k=M/\sqrt{L_1 L_2}$

b) circuite RLC derivație cuplate (capacitiv) prin condensatorul serie C_c. Coeficientul de cuplaj este:

$$k=\sqrt{C_1C_2}/\sqrt{(C_1+C_c)(C_2+C_c)}$$

De remarcat că un cuadripol de cuplaj este compus din elementul de cuplaj (M, respectiv C_c) și de elementele de același tip din primar și secundar (L_1, L_2, respectiv C_1, C_2).

O altă configurație uzuală de circuite cuplate este cea din fig. 3.27. Cele două circuite RLC derivație sînt identice și cuplate prin condensatorul derivație C_c. Coeficientul de cuplaj este:

$$k=C_c/(C+C_c)$$

Principalele mărimi și relații care caracterizează funcționarea acestui circuit sînt:

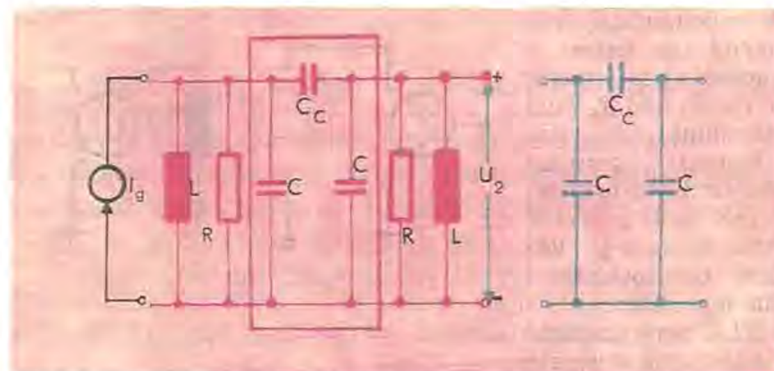


Fig. 3.27. Circuite RLC derivație identice, cuplate prin condensator derivație.

— factorul de calitate global (egal, în acest caz, cu factorii de calitate al primarului, Q_1 şi al secundarului, Q_2):

$$Q=\sqrt{Q_1Q_2}=Q_1=Q_2$$

— indicele de cuplaj $g=kQ$ (pentru abateri mici în jurul frecvenţei de rezonanţă);

— variaţia tensiunii de ieşire (U_2) raportată la tensiunea de ieşire pentru transfer maxim de putere (U_{2MM} — tensiune „maxim-maximorum"), în funcţie de variabila normată (v. fig. 3.19) $x=X_s/R_s=\beta Q$ şi de indicele de cuplaj g:

$$U_2/U_{2MM}=2gj/(1-x^2+g^2+2xj)$$

— frecvenţa de lucru (egală, în acest caz, cu frecvenţele de acord ale primarului, f_{01}, respectiv secundarului, f_{02})

$$f_0=f_{01}=f_{02}=1/2\pi\sqrt{L(C+C_c)}$$

— raportul U_2/U_{2MM} la frecvenţa de lucru (centrală):

$$U_{20}/U_{2MM}=2gj/(1+g^2)$$

— banda la 3 dB, pentru $g=1$ (cuplaj critic)

$$B_{3dBc}=f_0\sqrt{2(g^2+1)}/Q$$

— banda în sens Cebîşev, pentru $g>1$ (cuplaj supracritic)

$$B_c=f_0\sqrt{2(g^2+1)}/Q$$

— deviaţia de frecvenţă (la care se obţin cele două maxime ale caracteristicii de selectivitate — v. fig. 3.28), pentru $g>1$ (cuplaj supracritic),

$$\Delta f_M=\pm f_0\sqrt{g^2-1}/Q$$

Reprezentînd, pentru circuitele cuplate din fig. 3.27, variaţia raportului $|U_2/U_{2MM}|$ în funcţie de deviaţia de frecvenţă Δf (unde $\Delta f=f-f_{0k}$, pentru $k=1, 2, 3$; f_{0k}= frecvenţa de lucru pentru fiecare curbă) se obţin caracteristicile de selectivitate din fig. 3.28.

Prin adoptarea unui asemenea mod de reprezentare, caracteristicile rezultate sînt axate, deşi frecvenţele de lucru f_0 sînt diferite în fiecare caz (întrucît depind de valoarea capacităţii condensatorului de cuplaj C_c). Normarea tensiunii de ieşire s-a efectuat pentru cazul transferului maxim de putere (U_{2MM} obţinut pentru $g>1$). Caracteristicile sînt reprezentate pentru:

1) $g<1$ (cuplaj subcritic). Există un singur maxim (la frecvenţa f_{01}) şi nu se poate realiza transferul maxim de putere.

2) $g=1$ (cuplaj critic). Caracteristica prezintă un maxim plat (la frecvenţa f_{02}); dacă, în plus, şi $Q_1=Q_2$, se obţine un transfer maxim de putere într-o bandă de frecvenţe relativ largă, în jurul valorii f_{02}.

3) $g>1$ (cuplaj supracritic). Caracteristica are două maxime şi un minim — corespunzînd celor trei valori reale şi distincte ale frecvenţei de lucru posibile. Dintre acestea, minimul corespunde frecvenţei centrale f_{03}, iar maximele sînt simetric repartizate (faţă de f_{03}).

Se demonstrează că, dacă şi $Q_1=Q_2$, se poate obţine un transfer maxim de putere la frecvenţele de maxim (corespunzînd deviaţiei $\pm\Delta f_M$ — v. fig. 3.28).

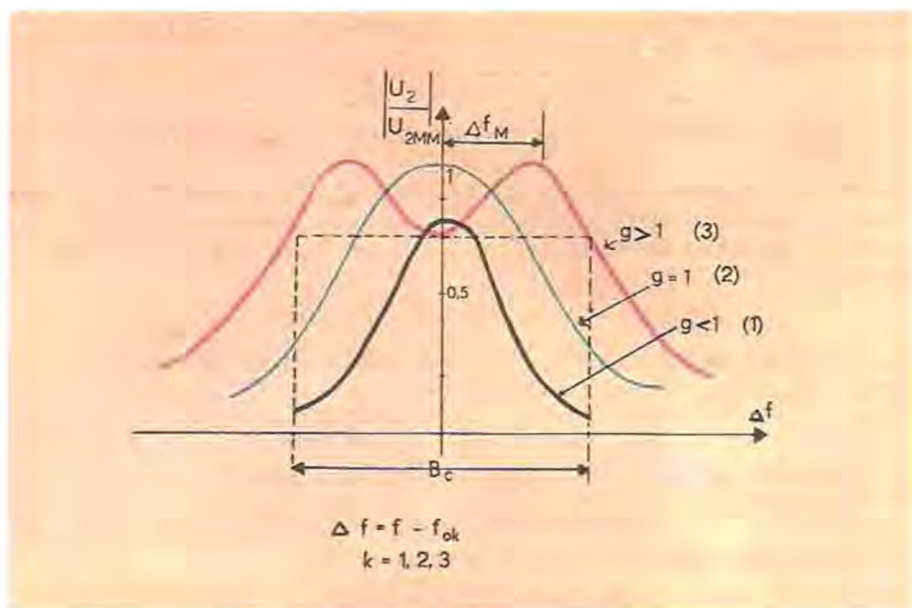


Fig. 3.28. Caracteristici de selectivitate ale circuitelor cuplate din fig. 3.27.

În primele două cazuri (un singur maxim), banda de trecere a circuitelor cuplate se definește ca diferența frecvențelor f_s și f_j pentru care raportul $|U_2/U_{2MM}|$ scade cu 3 dB față de valoarea sa maximă. Se demonstrează că, la cuplaj critic ($g=1$), B_{3dB} $(=f_0\sqrt{2}/Q)$ este de $\sqrt{2}$ ori mai largă decît banda de trecere a unui circuit oscilant simplu ($B_{3dB}=f_0/Q$).

În cazul curbei cu două maxime și un minim ($g>1$), banda de trecere se definește „în sens Cebîșev", ca fiind diferența dintre frecvențele la care raportul $|U_2/U_{2MM}|$ are valorile corespunzătoare minimului de la frecvența centrală f_{0k}. În această situație, banda de trecere este de $\sqrt{2(g^2+1)}$ ori mai largă decît în cazul circuitelor oscilante simple.

Dacă circuitele cuplate avînd schema din fig. 3.27 sînt neidentice, caracteristicile de selectivitate ale acestora pot avea aspectul celor din fig. 3.29. Există două cazuri fundamentale:

1) $Q_1=Q_2$; $f_{10}\neq f_{20}$ — cînd cele două maxime sînt inegale
2) $Q_1\neq Q_2$; $f_{10}=f_{20}$ — pentru care, la $g>1$, nu se mai poate obține $U_2=U_{2MM}$

Circuitele RLC cuplate sînt utilizate atît pentru a realiza cuplajul (în c.a) între două etaje amplificatoare cît și, mai ales, pentru a selecta din mulțimea semnalelor de diferite frecvențe numai pe acelea care au frecvența inclusă în banda de trecere a circuitului respectiv (atenuînd substanțial semnalele ce au frecvența în exteriorul acestei benzi).

Un exemplu de utilizare a circuitelor RLC cuplate pentru cuplarea a două etaje amplificatoare de bandă îngustă este prezentat în fig. 3.30.

Circuitele RLC derivație L_1C_1 și L_2C_2 sînt cuplate prin condensatorul C_c (v. și fig. 3.27).

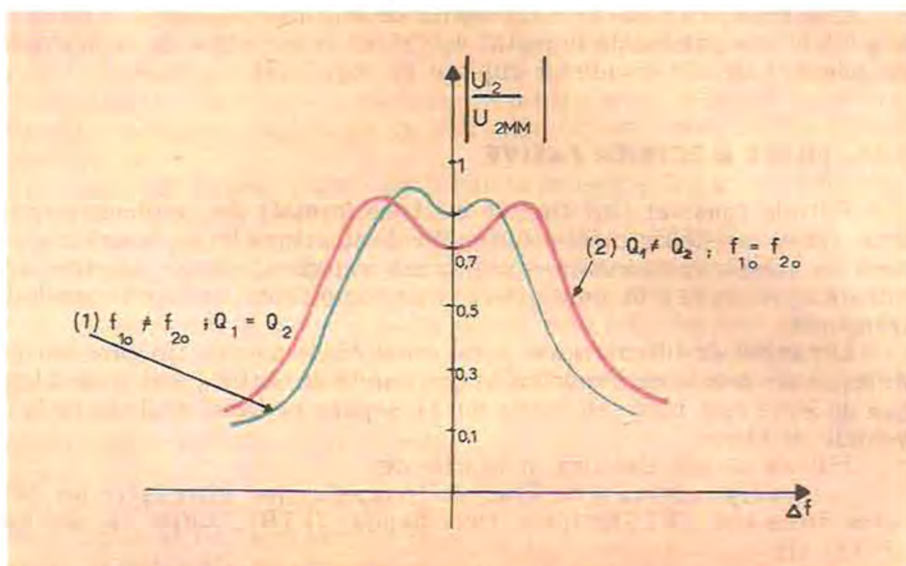


Fig. 3.29. Caracteristici de selectivitate ale unor circuite RLC cuplate, neidentice.

Schemele echivalente din fig. 3.30 evidenţiază modul de determinare a condiţiilor de adaptare. Utilizînd — în mod curent — circuite identice ($L_1=L_2$, $C_1=C_2$, $R_1=R_2=R$), la cuplaj critic ($g=1$), rezultă următoarele condiţii de adaptare, separate, pentru primar şi secundar:

$$R'_0=R; \quad R=R'_{in}$$

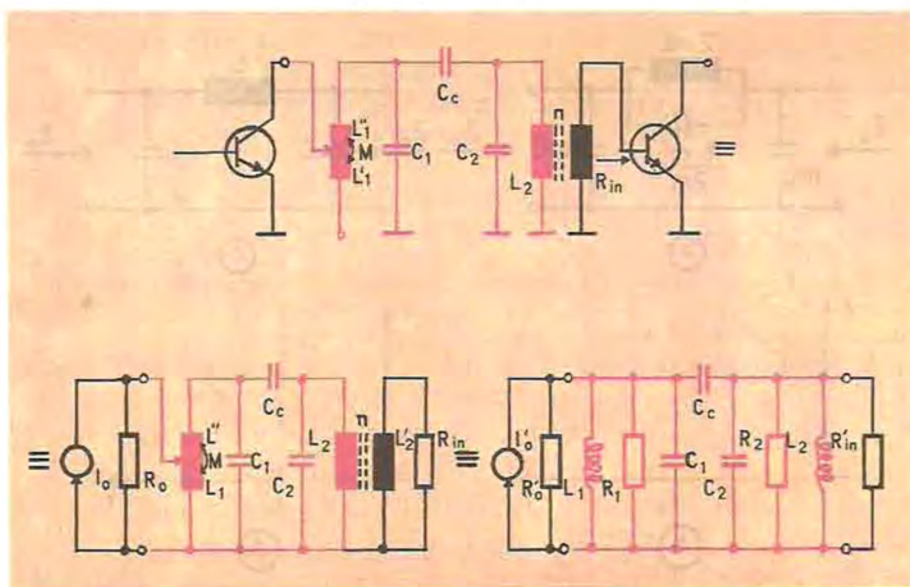


Fig. 3.30. Utilizarea circuitelor cuplate pentru cuplarea a două etaje de amplificare.

Este evident că banda frecvențelor ce se transmit între cele două etaje amplificatoare „de bandă îngustă“ este strict determinată de caracteristicile de selectivitate ale circuitelor cuplate (v. fig. 3.27).

3.6.5. FILTRE ELECTRICE PASIVE

Filtrele (pasive) sînt circuite electrice formate din condensatoare, bobine și/sau rezistoare care — în funcție de structura lor și de valorile parametrilor acestor componente — realizează transferul energiei electrice (de la intrare spre ieșire) în mod selectiv, corespunzător frecvenței semnalelor transmise.

Un astfel de filtru are cel puțin o bandă de trecere (în care tensiunea de ieșire are o valoare importantă) și o bandă de oprire (pentru care tensiunea de ieșire este nulă sau foarte mică), separarea lor efectuîndu-se la frecvențele de tăiere.

Filtrele se pot clasifica în funcție de:

— poziția relativă a benzilor de trecere/oprire: filtre trece-jos (FTJ), filtre trece-sus (FTS), filtre trece-bandă (FTB), filtre oprește-bandă (FOB) etc.

— tipul componentelor lor (și principiul de funcționare): filtre R-C, filtre L-C, filtre piezo-electrice, filtre magnetostrictive etc.

— modul de interconectare a componentelor: în scară, în punte, diferențiale etc.;

— caracteristicile de atenuare: tip k, tip „derivat“ (m, m_1—m_2, m—m') etc.

În general, filtrele sînt realizate sub forma unor cuadripoli simetrici constituiți — în mod ideal — din componente pur reactive (pentru evitarea pierderilor energetice).

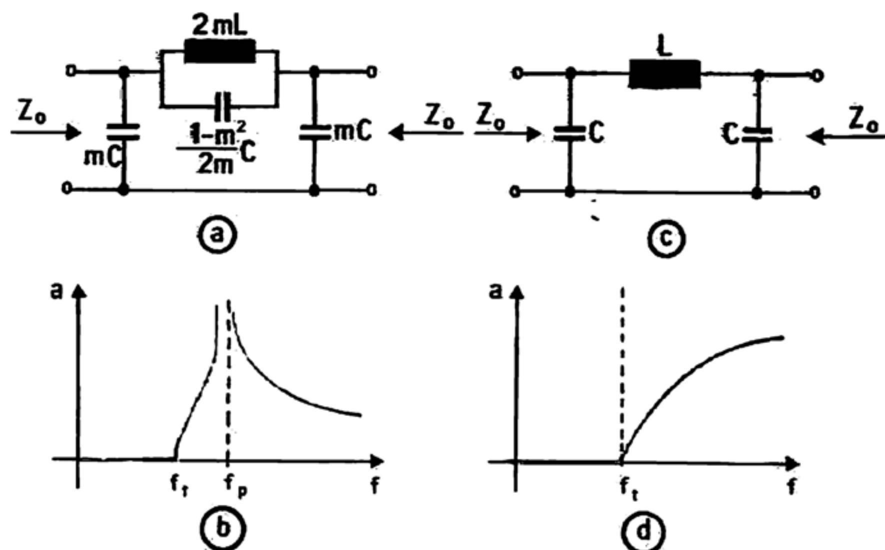


Fig. 3.31. Structuri de filtre trece-jos (FTJ) și variațiile atenuărilor — imagine corespunzătoare.

Astfel, de exemplu, un *filtru trece-jos* poate fi realizat ca în fig. 3.31 *a* (filtru tip „*m*-derivat"; cu $0<m<1$ şi caracteristica atenuare-imagine în funcţie de frecvenţă reprezentată în fig. 3.31 *b*) sau ca în fig. 3.31 *c* (filtru tip „*k*-constant", rezultînd din precedentul pentru $m=1$ şi avînd caracteristica atenuare-imagine în funcţie de frecvenţă reprezentată în fig. 3.31 *d*). Se observă că:

1) banda de trecere (cu $a=0$) şi banda de oprire (cu $a>0$) sînt separate prin frecvenţa de tăiere f_t;

2) delimitarea benzilor este insuficient de netă la filtrele tip *k* şi mult mai evidentă la cele de tip „*m*-derivat", prin introducerea unei atenuări foarte mari (teoretic infinită) la frecvenţa f_p (apropiată de frecvenţa de tăiere f_t). O asemenea situaţie se poate obţine prin introducerea unui circuit oscilant derivaţie într-o ramură serie sau a unui circuit oscilant serie într-o ramură derivaţie a filtrului tip *k* (presupunînd că elementele constitutive ale acestora sînt pur reactive, fără pierderi), realizîndu-se astfel filtrele tip „*m*-derivat".

3) frecvenţele de tăiere f_t ale celor două tipuri de FTJ sînt identice întrucît şi impedanţele lor imagine Z_0 sînt (prin definiţie) identice şi variază în acelaşi mod în funcţie de frecvenţă (v. fig. 3.32).

4) atenuarea-imagine *a* se defineşte pentru cazul în care celula de filtrare funcţionează adaptată pe impedanţele-imagine Z_0 la ambele extremităţi (porţi).

Filtrele trece-jos avînd schemele din fig. 3.31 *a* şi 3.31 *c* au impedanţa-imagine $Z_0=R+jX$ reprezentată în funcţie de frecvenţa f_t conform fig. 3.32.

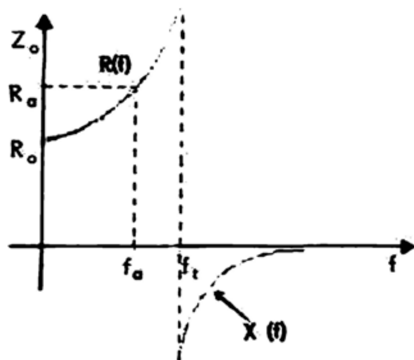


Fig. 3.32. Variaţia impedanţei imagine $Z_0(f)=R(f)+jX(f)$ pentru FTJ din fig. 3.31.

Se observă că, pentru $f<f_t$ (în banda de trecere), $Z_0(f)=R(f)$ → impedanţa este reală, iar pentru $f>f_t$ (în banda de oprire), $Z_0(f)=jX(f)$ → impedanţa este imaginară.

Adaptarea impedanţei-imagine la impedanţa generatorului (sau la impedanţa de sarcină a filtrului) se poate realiza — în banda de trecere — doar la o anumită frecvenţă $f=f_a$, pentru care $Z_0=R_a$. La $f=0$, impedanţa-imagine (pur rezistivă, întrucît $f<f_t$), devine rezistenţa caracteristică R_0.

Principalele mărimi şi relaţii de calcul sînt:

— impedanţa-imagine $Z_0(f)=Rf_t/\sqrt{f_t^2-f^2}$

— rezistenţa caracteristică $R_0=\sqrt{L/2C}$

— frecvenţa de tăiere $f_t=1/\pi\sqrt{2LC}$

— frecvenţa de atenuare infinită $f_p=f_t/\sqrt{1-m^2}$

Modificînd structura filtrului (celulei) trece-jos tip „*m*-derivat" fig. 3.31 *a*) ca în fig. 3.33, se obţine o semicelulă („jumătate de secţiune") de

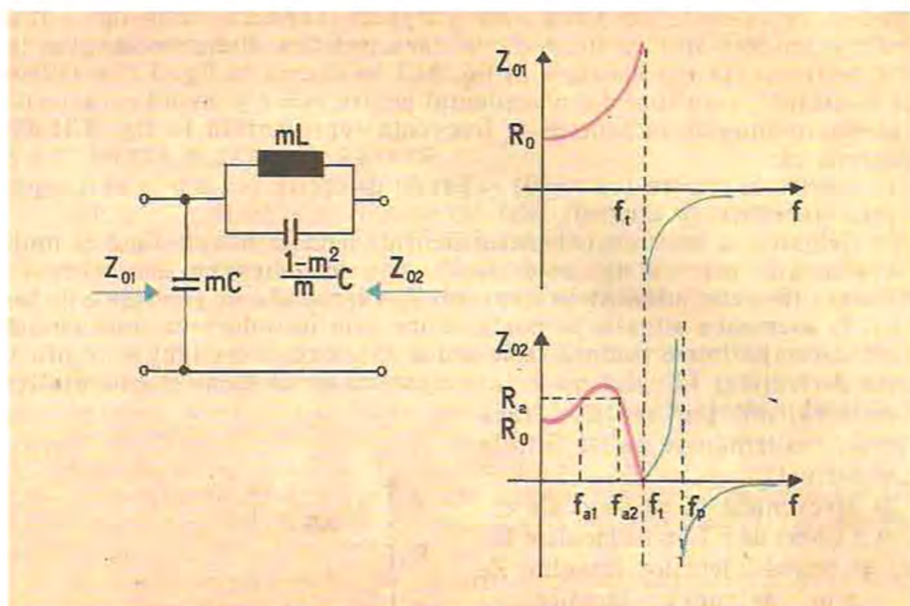


Fig. 3.33. Semicelulă de adaptare şi variaţia impendanţelor-imagine în funcţie de frecvenţă.

adaptare, pentru care se definesc două impedanţe-imagine, Z_{01} şi Z_{02} (la cele două extremităţi/porţi) avînd dependenţe diferite de frecvenţa f.

Se observă că, dacă $Z_{01}(f)$ are aceeaşi alură cu $Z_0(f)$ (pentru filtrele tip „m-derivat" şi „k-constant" — v. fig. 3.32), $Z_{02}(f)$ variază astfel incit apar două valori f_{a1} şi f_{a2} pentru care se realizează adaptarea ($Z_{02}=R_a$).

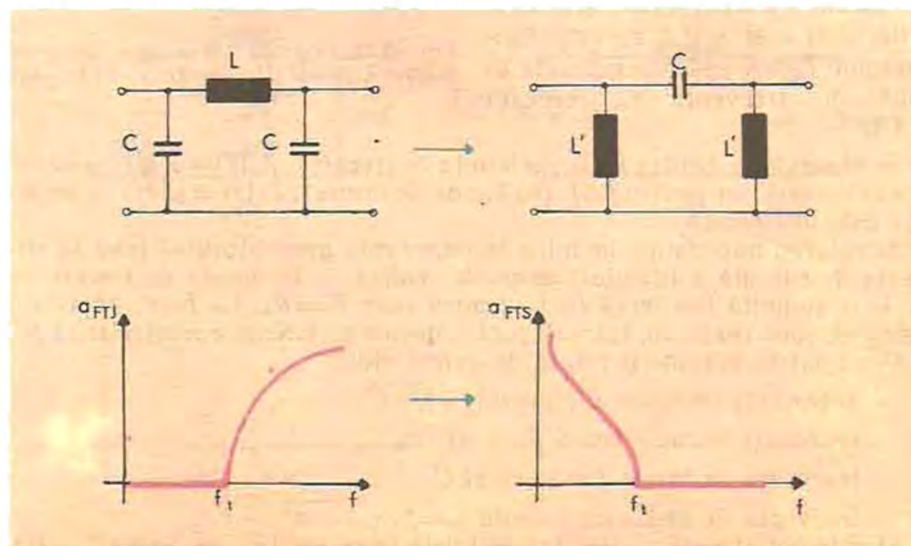


Fig. 3.34. Transformarea unei celule FTJ în celulă FTS (tip „k-constant").

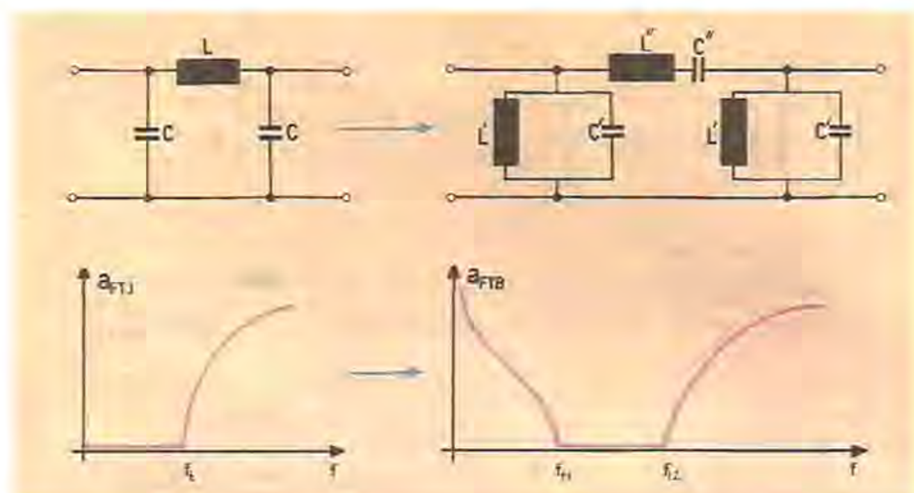


Fig. 3.35. Transformarea unei celule FTJ în celulă FTB (tip „k constant").

Celula de filtru trece-jos (FTJ) tip „*k*-constant" din fig. 3.31 *c* se poate transforma într-o celulă de filtru trece-sus (FTS) — ca în fig. 3.34 sau într-o celulă de *filtru trece-bandă* (FTB) — ca în fig. 3.35.

În primul caz, transformarea se realizează fizic prin înlocuirea condensatoarelor cu bobine şi a bobinei cu un condensator, iar matematic (în relaţiile de calcul — inclusiv pentru $a(f)$), prin schimbarea variabilei jf/f_t în $-jf_t/f$. Astfel, benzile de trecere şi de oprire îşi intervertesc poziţiile, iar alura curbei $a(f)$ se modifică substanţial (v. fig. 3.34).

În al doilea caz, transformarea se realizează fizic prin înlocuirea condensatoarelor cu circuite LC derivaţie şi a bobinei cu un circuit LC serie, iar matematic (în relaţiile de calcul corespunzătoare), prin înlocuirea variabilei jf/f_t cu $jK(f/f_0-f_0/f)$, unde $f_0=\sqrt{f_{t1}f_{t2}}$, iar K=constantă.

Banda de trecere a FTB astfel obţinut este cuprinsă între f_{t1} şi f_{t2}, benzile de oprire fiind situate în exteriorul acestui interval.

Evident că se pot realiza transformări similare atît pentru obţinerea unei celule filtru opreşte-bandă (FOB) tip „*k*-constant" cît şi în cazul filtrelor tip „*m*-derivat" (pentru obţinerea FTS, FTB, FOB dintr-un FTJ).

O altă categorie de filtre electrice o reprezintă *filtrele de netezire* (fig. 3.36).

Un astfel de filtru este întotdeauna prezent în circuitele de alimentare cu tensiune continuă (fig. 3.36 *a*) fiind conectat între redresor şi sarcina acestuia (stabilizator de tensiune continuă, rezistenţă de sarcină etc.), în scopul reducerii substanţiale a pulsaţiilor tensiunii redresate u_3. (Se ştie că orice tensiune redresată conţine o componentă continuă peste care se suprapune o componentă alternativă/pulsatorie dăunătoare).

Raportul dintre valoarea maximă a componentei alternative (amplitudinea primei armonici, U_{3Max}) şi componenta continuă U_{30} se numeşte factor de ondulaţie (γ).

Se demonstrează că, în cazul redresării monoalternanţă (fig. 3.36 *b*), $U_{30}=U_{3Max}/\pi (\gamma=\pi/2=1{,}57)$, iar în cazul redresării bialternanţă (fig. 3.36 *c*), $U_{30}=2U_{3Max}/\pi$, $(\gamma=2/3=0{,}66)$.

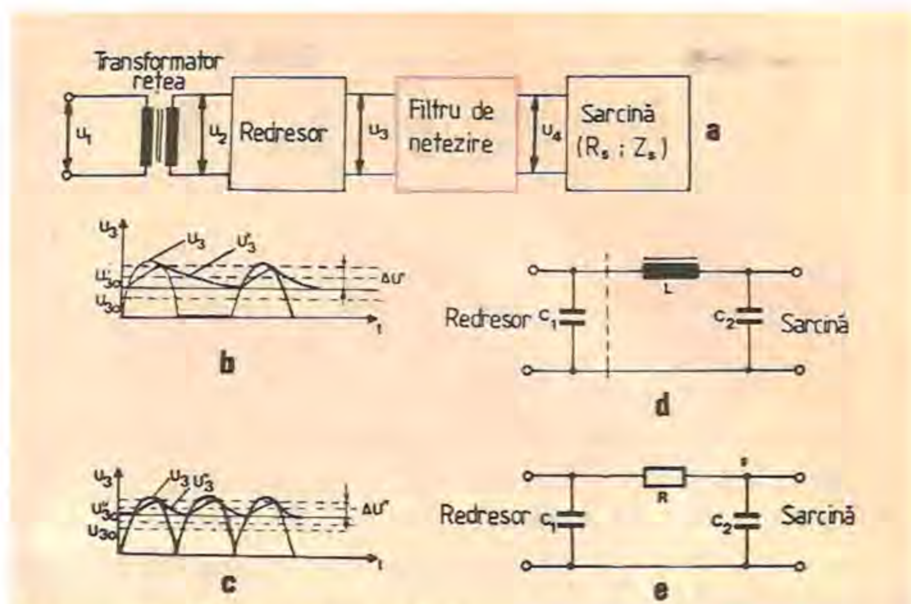


Fig. 3.36. Filtre de netezire tip LC şi tip RC.

Dar necesităţile curente impun o netezire mult mai accentuată a tensiunii redresate (deci un factor de ondulaţie γ cît mai mic) pentru a obţine o tensiune u_4 practic continuă. Filtrul de netezire utilizat în acest scop trebuie să atenueze cît mai puţin componenta continuă şi cît mai mult componenta alternativă a tensiunii redresate. Pentru a îndeplini această funcţie, filtrul trebuie să conţină componente cu impedanţă mare conectate în serie şi elemente cu impedanţă mică plasate în paralel.

Filtrele de netezire cel mai frecvent utilizate sînt formate din celule LC (fig. 3.36 *d*) sau din celule RC (fig. 3.36 *e*), conectate în paralel pe „condensatorul de netezire" C_1 (de ordinul zecilor . . . sutelor de μF).

Pe durata impulsurilor de tensiune redresate, condensatorul C_1 se încarcă rapid (prin rezistenţa redusă de ieşire a redresorului), iar în intervalul de timp dintre două impulsuri, condensatorul C_1 se descarcă mai lent prin rezistenţa de sarcină (mai mare decît rezistenţa de încărcare). Tensiunea u_3 devine în acest caz u_3' (respectiv u_3'') avînd componenta continuă U_{30} (respectiv U_{30}) şi componenta alternativă $\Delta U'$ (respectiv $\Delta U''$). Este evidentă reducerea substanţială a acestei ultime componente — valorile uzuale ale factorului de ondulaţie γ fiind, în acest caz, de ordinul 0,05 . . . 0,1.

O reducere şi mai accentuată a acestor ondulaţii se realizează cu ajutorul filtrelor de netezire compuse din celule LC sau RC. Acestea pot fi considerate şi ca divizoare de tensiune avînd un factor de divizare apropiat de unitate — pentru componenta continuă a tensiunii redresate — şi un factor de divizare mare — pentru componenta de curent alternativ (Componenta pulsatorie a tensiunii redresate fiind nesinusoidală — dar periodică — se poate descompune într-o sumă de sinusoide — „armonicile". În consecinţă, valoarea eficace a acestei componente este determinată de suma valorilor

eficace ale fiecărei armonici în parte. Dar, întrucît aceste valori eficace scad rapid cu ordinul armonicii, în calcule se poate lua în considerare doar prima armonică).

Filtrul LC (fig. 3.36 *d*) poate asigura o bună filtrare fără pierderi importante de tensiune continuă. Funcționarea sa se explică prin acumularea de energie în cîmpul magnetic al bobinei şi cedarea acesteia în sarcină (între două impulsuri ale tensiunii redresate). Bobina L reprezintă o reactanță mare pentru componenta alternativă a u, astfel încît prin ea va trece doar un curent alternativ de intensitate foarte mică. Condensatorul C_2 — avînd o reactanță foarte redusă (comparativ cu rezistența de sarcină) — va prelua aproape integral acest curent alternativ, astfel încît pe rezistența de sarcină apar componenta continuă a u şi o foarte mică parte din componenta alternativă a acesteia.

Se observă că, întrucît reactanța bobinei ($X_L = \omega_p L$) este proporțională cu frecvența unghiulară a pulsațiilor ω_p, filtrul LC este cu atît mai eficient cu cît această frecvență este mai ridicată. În consecință, filtrele de acest tip nu se utilizează decît în cazul redresoarelor bialternanță.

Se defineşte coeficientul de filtraj μ ca fiind raportul tensiunilor pulsatorii de la intrarea şi de la ieşirea filtrului (ΔU_3, respectiv ΔU_4).

Cunoscînd frecvența unghiulară a pulsațiilor (ω_p) şi rezistența de sarcină (R_S) şi impunînd coeficientul μ, se pot calcula valorile inductanței L şi condensatorului C_2 cu relațiile:

$$1/\omega_p C_2 \ll R \quad ; \quad LC_2 = (\mu+1)/\omega_p^2$$

În general, bobinele din filtrele de netezire tip LC au cîteva mii de spire şi inductanțe $L = 1 \ldots 10$ H. Condensatoarele din filtrele LC sau RC sînt de regulă electrolitice, avînd capacitatea de ordinul zecilor ... sutelor de µF şi o tensiune de lucru mai mare cu 20 ... 50% decît valoarea tensiunii redresate (U_{30}).

Filtrul RC (fig. 3.36 *e*) — este mai ieftin decît filtrul LC, întrucît rezistorul R are atît un preț de cost cît şi un volum mult mai mici, comparativ cu bobina de filtraj L. În schimb, apare dezavantajul unor căderi de tensiune importante pe rezistor; în consecință, nu se pot utiliza rezistoare de valori prea mari, ceea ce implică obținerea unor efecte de filtraj mai reduse. Totuşi, datorită avantajelor sale, filtrul RC este utilizat aproape exclusiv atunci cînd curentul de sarcină nu depăşeşte 50 mA.

Impunînd căderea de tensiune maximă (U_{RMax}) pe rezistorul R, se poate determina valoarea rezistenței acestuia cu ajutorul relației $U_{RMax} = RI_{SMax}$ (I_{SMax}=curent maxim de sarcină). Cunoscînd frecvența unghiulară a pulsațiilor ω_p şi impunînd coeficientul de filtraj μ, se poate calcula capacitatea condensatorului C_2 cu relația:

$$C_2 R = \mu/\omega_p$$

De remarcat că filtrele de netezire prezentate nu asigură eliminarea completă a componentei alternative — ci doar o reducere a acesteia. Efecte de filtraj şi mai accentuate se pot obține prin conectarea în cascadă a mai multor celule tip LC şi/sau RC, dar şi prin utilizarea unor filtre de netezire cu elemente active.

Capitolul 4

CABLAJE IMPRIMATE

4.1. GENERALITĂŢI

Utilizarea cablajelor (circuitelor) imprimate constituie actualmente soluţia constructivă cea mai performantă şi mai răspîndită de interconectare a componentelor în circuite electrice/electronice din montaje, aparate şi echipamente electronice. Folosite pentru prima dată în 1945 (în aparatură militară), cablajele imprimate au înlocuit, treptat şi pretutindeni, vechile cablaje „spaţiale", filare (convenţionale), introducînd modificări importante în construcţia şi tehnologia echipamentelor electronice atît profesionale cît şi de larg consum.

Principalele avantaje ale cablajelor imprimate sînt:

— realizează o mare densitate de montare a componentelor, permiţînd reducerea volumului şi greutăţii (deci miniaturizarea) aparatelor electronice;

— asigură poziţionarea precisă şi fixă a componentelor şi a interconexiunilor acestora în circuite — permiţînd creşterea fiabilităţii în funcţionare şi reducerea/compensarea cuplajelor parazite dintre componente şi/sau circuite;

— asigură o rezistenţă superioară a echipamentelor electronice (din care fac parte) la solicitări mecanice, termice şi climatice, îmbunătăţind totodată considerabil mentenabilitatea acestora;

— simplifică şi reduc durata operaţiilor de montaj, facilitînd automatizarea acestora, reducînd posibilităţile de montare eronată şi asigurînd un înalt grad de reproductibilitate;

— fac posibilă unificarea şi standardizarea constructivă a subansamblelor (blocurilor, modulelor) funcţionale din structura aparatelor/echipamentelor electronice, permiţînd interconectarea simplă, rapidă, precisă şi fiabilă a acestora.

Există totuşi şi unele dezavantaje, minore, ale cablajelor imprimate:

— orice modificări ulterioare ale circuitelor (şi, uneori, chiar ale componentelor) sînt relativ dificil de efectuat;

— majoritatea tipurilor de cablaje imprimate sînt sensibile la şoc termic — ceea ce impune unele precauţii la lipirea terminalelor componentelor.

4.2. STRUCTURA ŞI CLASIFICAREA CABLAJELOR IMPRIMATE

Un cablaj imprimat este un sistem de conductoare plate (imprimate) amplasate în unul, două sau mai multe plane paralele şi fixate (cu adeziv) pe suprafaţa unui suport electroizolant (dielectric) care asigură şi susţinerea mecanică a componentelor.

a) Suportul electroizolant al circuitelor imprimate este realizat din materiale avînd proprietăţi fizico-chimice, electrice, mecanice şi termice adecvate.

Există mai multe categorii de asemenea materiale, dar cele mai frecvent utilizate în prezent pentru cablaje rigide sînt (fig. 4.1):



Fig. 4.1. Principalele materiale electroizolante utilizate ca suport al circuitelor imprimate.

— PERTINAXUL (temperatura maximă de lucru 105°C) — pe bază de textură din hîrtie impregnată cu răşini fenolice — ce constituie materialul standard pentru solicitări normale în cele mai diverse aplicaţii.

— STECLOTEXTOLITUL (temperatură maximă de lucru: 150°C) — pe bază de textură din fibre de sticlă impregnată cu răşini epoxidice — larg utilizat în aparatura electronică profesională întrucît permite obţinerea unor performanţe superioare.

În ultimul timp, pentru realizarea cablajelor profesionale sînt utilizate şi suporturi ceramice (anorganice) avînd proprietăţi termice excelente, dar rezistenţă mecanică (la şocuri) redusă.

Circuitele imprimate flexibile utilizează drept suport materiale termoplaste ca: ACLAR (max. 200°C), TEFLON (max. 274°C), KAPTON (max. 400°C).

b) Traseele conductoare (cablajul imprimat propriu-zis) se realizează din materiale avînd proprietăți adecvate: rezistivitate electrică redusă, bună sudabilitate, rezistență mare la coroziune. În general, cel mai frecvent utilizat material este cuprul electrolitic de înaltă puritate — formînd o folie (de grosimi normalizate uzuale: 35 μm sau 70 μm) aplicată pe suprafața suportului electroizolant (împreună cu care formează semifabricatul „placat" din care, prin operații tehnologice specifice, se obțin cablajele imprimate avînd diferite structuri, configurații, dimensiuni etc.)

În unele aplicații profesionale se pot utiliza și aurul, argintul sau nichelul. În scopul facilitării lipirii terminalelor componentelor (pe aceste trasee conductoare) ca și pentru asigurarea unor contacte electrice fiabile (în cazul utilizării unor conectoare special construite pentru cablaje imprimate, folia de cupru se acoperă — uneori — cu o peliculă de cositor (prin „precositorire"), de aur sau de argint.

c) Adezivii utilizați pentru fixarea foliei de cupru pe suportul electroizolant de tip PERTINAX — de regulă, rășini speciale — trebuie să reziste la temperatura de lipire și să fie suficient de elastici (pentru a prelua — la lipire — diferențele de dilatare dintre suport și folie).

Materialele electroizolante de tip STECLOTEXTOLIT nu necesită adezivi.

Semifabricatele placate cu cupru se produc la diferite dimensiuni — mai frecvente fiind: 900×900 mm sau 900×1 800 mm. Din acestea se debitează plăcile cu viitoarele cablaje imprimate ale căror dimensiuni nu trebuie să depășească 240×360 mm — pentru cablaje simplu/dublu strat și 200×240 mm — pentru cablajele multistrat, astfel încît procesul tehnologic de realizare a acestora să nu devină prea dificil [14].

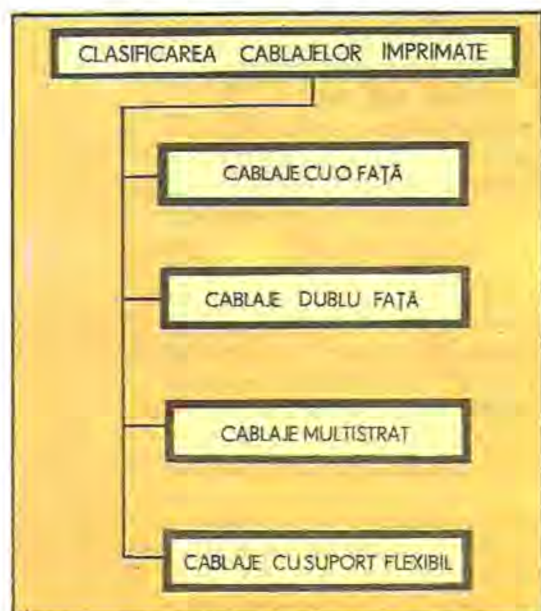


Fig. 4.2. Clasificarea cablajelor imprimate.

În fig. 4.2 se prezintă o clasificare a cablajelor imprimate după numărul planelor în care sînt amplasate traseele conductoare precum și după caracteristicile mecanice ale suportului izolant:

a) cablajele *cu o față („cablaje simplu strat" sau cablaje monostrat")* — sînt cele mai vechi și mai frecvent utilizate cablaje imprimate, fiind destinate — în special — aparaturii electronice de larg consum. Au cel mai simplu proces tehnologic de fabricație și cele mai reduse costuri de producție, dar nu permit obținerea unor mari densități de montaj, motiv

pentru care ponderea lor — pe ansamblul producţiei de cablaje imprimate — este în scădere;

b) cablajele *dublu faţă* („cablaje dublu strat") — sînt actualmente cele mai utilizate în construcţia aparatelor şi echipamentelor electronice profesionale întrucît asigură o densitate ridicată de montaj, la un preţ de cost relativ scăzut. Procesul tehnologic de realizare este însă mai complex, implicînd — în unele cazuri — şi metalizarea găurilor în care se implantează terminalele componentelor.

c) cablajele *multistrat* — sînt destinate exclusiv echipamentelor electronice profesionale întrucît asigură o densitate de montaj şi proprietăţi electrice superioare tuturor celorlalte tipuri (permiţînd interconectarea mai simplă a numeroase circuite integrate tip LSI sau VLSI). Dar procesul lor tehnologic de realizare este complex şi costisitor întrucît metalizarea găurilor este mult mai dificilă (v. § 4.6).

d) cablajele *cu suport flexibil* — au tendinţa de-a înlocui, în ultimul timp, atît cablajele imprimate rigide — prezentate mai sus — cît şi „formele de cablu" (compuse din diferite tipuri de conductoare) care interconectează subansamblele echipamentelor electronice.

Cablajele imprimate flexibile au numeroase avantaje:

— sînt mai uşoare şi mai puţin voluminoase decît cele rigide (fiind destinate în principal echipamentelor la care greutatea şi volumul sînt esenţiale — de ex. aparatele electronice aerospaţiale, calculatoarele electronice etc;

— permit realizarea unor mari densităţi de montaj şi obţinerea unei fiabilităţi superioare în exploatare, reducînd mult — sau chiar eliminînd — posibilitatea cuplajelor parazite între circuite;

— formează un sistem de interconectare tridimensională întrucît nu numai că pot fi — eventual — îndoite, răsucite şi deplasate, dar pot avea orice geometrie (spre diferenţă de cablajele rigide — avînd, de regulă, formă dreptunghiulară).

Dar lipirea componentelor pe astfel de cablaje este, de obicei mai avantajoasă dacă se efectuează manual (deci cu o productivitate relativ scăzută) şi nu automat.

4.3. METODE ŞI TEHNOLOGII DE REALIZARE A CABLAJELOR IMPRIMATE

Pentru realizarea cablajelor imprimate — cu mijloace industriale sau artizanale — se pot utiliza peste 30 metode (tehnologii) diferite ce pot fi, totuşi, grupate în două mari categorii, principial opuse (fig. 4.3):

a) metodele *substractive* („de corodare") — implicînd prelucrarea unui semifabricat placat cu cupru şi obţinerea traseelor circuitului imprimat prin înlăturarea unor porţiuni din folia electroconductoare aderentă la suportul electroizolant. Îndepărtarea acestor zone se poate face fie pe cale chimică (prin corodare) — avînd în prezent cea mai mare pondere pe ansamblul cablajelor imprimate — fie pe cale mecanică, prin segmentarea şi eliminarea foliei.

b) metodele *aditive* („de depunere") — impunînd metalizarea unui semifabricat din material electroizolant neplacat. Din această categorie fac

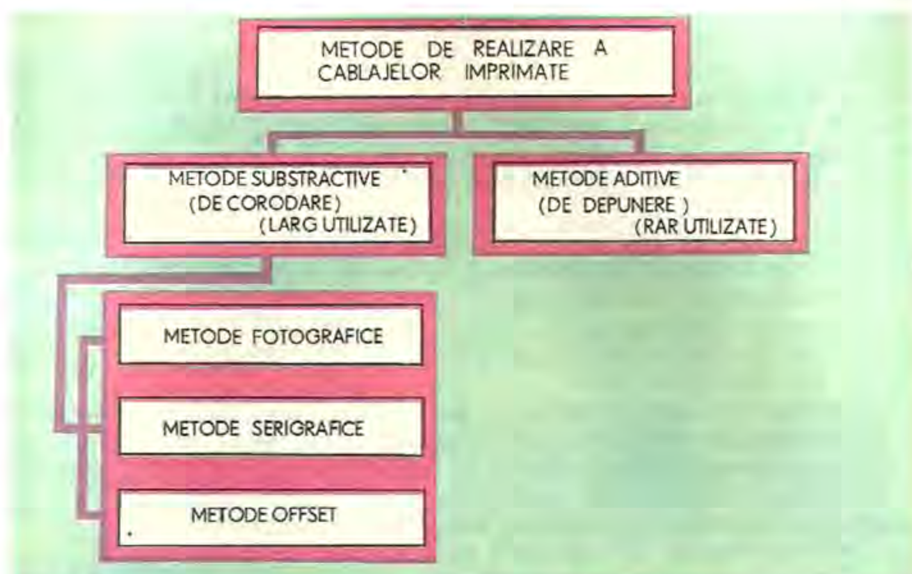


Fig. 4.3. Metode (tehnologii) de realizare a cablajelor imprimate.

parte: metoda electrochimică, metoda transferului, metoda arderii în cuptor, metoda pulverizării catodice şi termice etc.

Actualmente predomină metodele substractive, dar a apărut şi o tendinţă de extindere a metodelor de depunere — avînd în vedere necesitatea reducerii consumului de cupru.

Există şi o a treia categorie de metode (mai rar utilizate) — „metodele combinate" — la care se folosesc tehnologii specifice atît metodelor substractive cît şi celor aditive.

Aproape în toate cazurile este necesară transpunerea configuraţiei circuitului de realizat de pe un desen pe semifabricatul de prelucrat. Această operaţie se realizează industrial — cu metode fotografice, serigrafice sau offset, iar artizanal — prin desenare manuală sau vopsire cu şablon şi pensulă (sau pulverizator).

4.4. REALIZAREA CABLAJELOR IMPRIMATE MONOSTRAT PRIN METODE DE CORODARE

În prezent, în ţara noastră, cablajele imprimate se realizează aproape exclusiv prin metode de corodare, transpunerea desenului pe folia din cupru realizîndu-se fie prin fotografiere, fie prin serigrafiere.

Orice proces tehnologic de realizare a cablajelor imprimate prin metode de corodare comportă următoarele etape principale (fig. 4.4):

1) realizarea desenului de cablaj (la o scară mărită, între 2:1 — pentru cablajele normale, şi 4:1 — pentru cablajele de mare fineţe) pe hîrtie specială, conform principiilor de proiectare a cablajelor imprimate (v. § 4.5). Traseele conductoarelor imprimate se desenează cu tuş negru (sau se realizează din elemente adezive, special concepute), obţinîndu-se astfel originalul desenului cablajului imprimat („fotooriginalul").

2) realizarea filmului fotografic („fotoşablonului" sau „măştii") prin fotografierea fotooriginalului pe film de mare contrast şi cu reducere corespunzătoare a formatului (la scara desenului), astfel încît negativul foto obţinut să rezulte în mărime naturală.

3) transpunerea (imprimarea) imaginii cablajului de pe filmul fotografic pe suportul placat cu cupru — fie prin metoda fotografică, fie prin metoda serigrafică.

4) efectuarea unor prelucrări mecanice adecvate (după realizarea corodării): găurire, tăiere (decupare), debavurare etc. urmate de realizarea unei acoperiri de protecţie (lăcuire).



Fig. 4.4. Etapele de bază ale unui proces tehnologic de realizare a cablajelor imprimate.

4.4.1. METODA FOTOGRAFICĂ

În cazul transpunerii imaginii cablajului imprimat de pe film (fotoşablon) pe semifabricatul placat prin metoda fotografică, principalele etape ale procesului tehnologic respectiv sînt prezentate în fig. 4.5.

Această metodă permite obţinerea unor rezoluţii şi precizii maxime — deci a unor trasee fine de cablaj — dar are dezavantajul productivităţii scăzute şi este costisitoare. În consecinţă, se utilizează cu precădere în producţia de serie mică şi de unicate.



Fig. 4.5. Transpunerea imaginii pe semifabricatul placat, prin fotografiere.

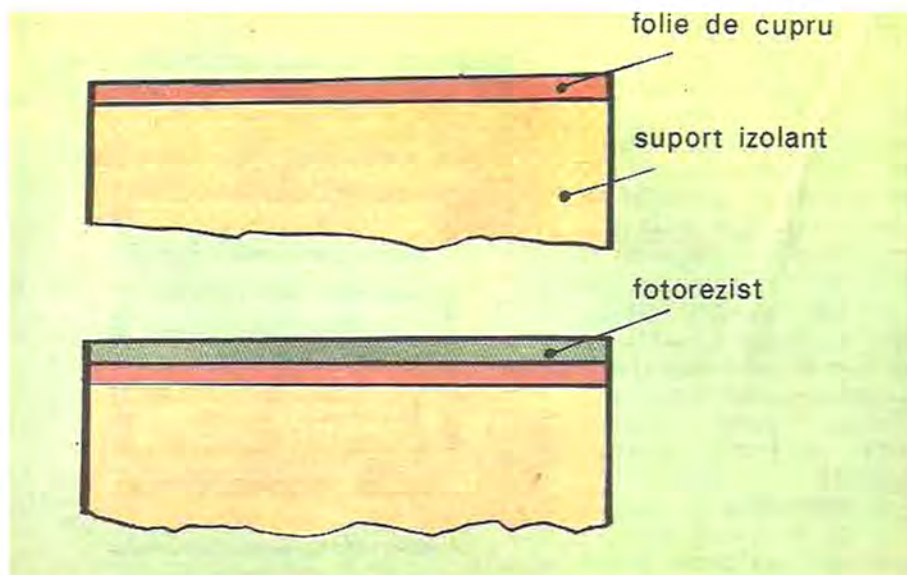


Fig. 4.6. Pregătirea și acoperirea foliei de cupru a semifabricatului placat.

Rolul acestor etape în transformarea semifabricatului placat reiese din fig. 4.6.—4.8.

Într-o primă fază (fig. 4.6) — conform primelor două etape prezentate în fig. 4.5. — după o spălare și o degresare prealabilă a foliei de cupru, aceasta se acoperă cu un strat fotosensibil de FOTOREZIST.

În faza următoare (fig. 4.7), se expune stratul de fotorezist la lumină prin intermediul fotoșablonului (realizat anterior, ca mai sus) transferîndu-se astfel configurația circuitului imprimat de realizat pe folia de cupru.

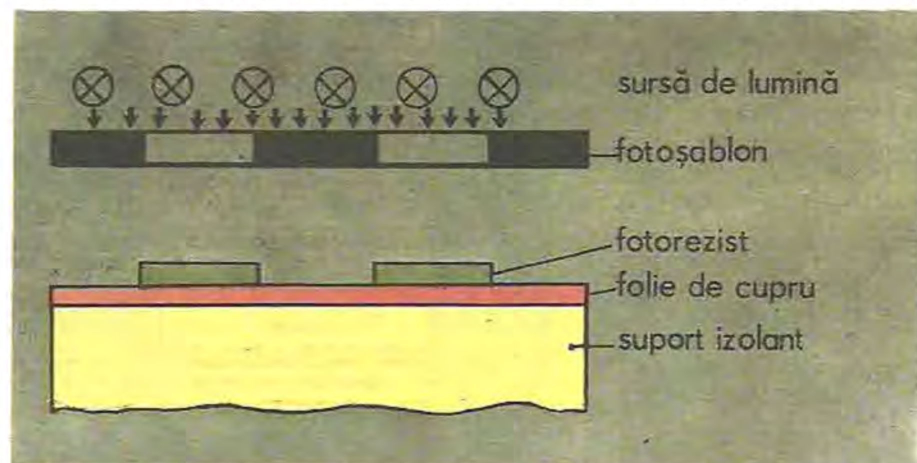


Fig. 4.7. Prelucrarea stratului de fotorezist negativ (prin expunere, developare-fixare și îndepărtarea zonelor neexpuse luminii).

După developare şi fixare fotografică, anumite zone din fotorezist devin insolubile, iar celelalte pot fi dizolvate şi îndepărtate cu ajutorul unui solvent special. Astfel, la fotorezistul negativ, porţiunile expuse la lumină polimerizează şi devin insolubile, spre diferenţă de fotorezistul pozitiv la care zonele neexpuse luminii devin insolubile.

Se obţine astfel — în primul caz (fig. 4.7) — o acoperire a foliei de cupru cu fotorezist, doar în zonele corespunzătoare porţiunilor transparente ale fotoşablonului. Stratul rămas se fixează pentru a-i mări rezistenţa la reactivul de corodare.

Urmează — conform ultimelor două etape prezentate în fig. 4.5 — faza de prelucrare a foliei de cupru (fig. 4.8). Cea mai importantă etapă constă

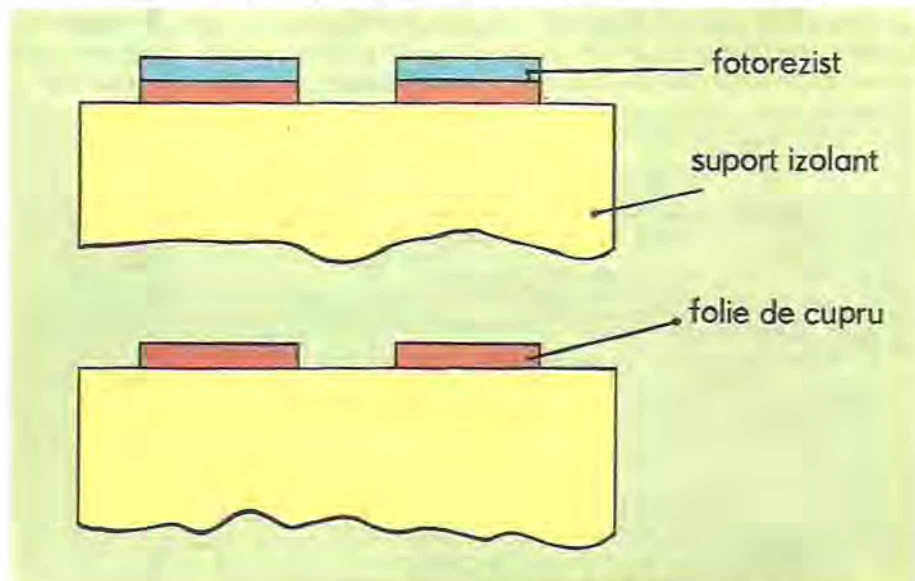


Fig. 4.8. Prelucrarea foliei de cupru prin corodare.

în corodare (specifică metodelor substractive), implicînd imersarea semifabricatului placat într-o cuvă (de dimensiuni adecvate) cu clorură ferică. Au loc reacţii chimice determinînd corodarea şi îndepărtarea foliei de cupru numai în zonele neacoperite cu stratul protector de fotorezist (fig. 4.8) corespunzînd, în cazul fotorezistului negativ, zonelor neexpuse la lumină (deci porţiunilor opace ale fotoşablonului). Corodarea poate dura pînă la cîteva zeci de minute şi se consideră încheiată atunci cînd în zonele neacoperite de fotorezist apare suportul electroizolant al semifabricatului.

După corodare se realizează succesiv:

— îndepărtarea stratului protector de fotorezist (depus pe traseele circuitului imprimat);

— debitarea/decuparea plăcii la dimensiunile finale;

— efectuarea găurilor necesare montării componentelor pe placă şi a plăcii în aparat/echipament;

— debavurarea muchiilor plăcii şi a găurilor;

— curăţarea (cu apă caldă şi spirt);

— lăcuirea — în scopul asigurării protecției anticoroziune și al facilitării efectuării lipirilor cu cositor.

Se obține astfel un produs finit — placa cu cablaj imprimat (sau cu „circuite imprimate") — pe care urmează să se monteze (prin implantare și lipire) toate componentele pasive și active prevăzute.

4.4.2. METODA SERIGRAFICĂ

Transpunerea imaginii cablajului imprimat de pe filmul fotografic (fotoșablon) pe semifabricatul placat se poate efectua și prin metoda serigrafică („serigrafie"). Deși această metodă realizează unii parametri calitativi inferiori celor obținuți prin metoda fotografică (rezoluție: 1,5 mm în loc de 0,5 mm; precizie: ±0,3 mm în loc de ±0,15 mm), ea este larg utilizată în producția industrială de mare serie a cablajelor imprimate întrucît asigură obținerea unei productivități maxime și a unui preț de cost mai redus, permițînd totodată automatizarea totală a procesului tehnologic respectiv.

Principalele etape ale metodei serigrafice sînt indicate în fig. 4.9.



Fig. 4.9. Transpunerea imaginii pe semifabricatul placat, prin serigrafiere.

În acest caz, configurația cablajului imprimat de realizat este protejată contra corodării prin aplicarea unui strat de vopsea/cerneală serigrafică specială, cu ajutorul unei „site serigrafice" specifice.

Această sită (sau „șablon") este de regulă o „pînză" cu ochiuri foarte fine și bine întinsă pe o ramă dreptunghiulară avînd dimensiunile mai mari decît cele ale plăcii cu cablaj imprimat. Realizarea sitei serigrafice implică obturarea anumitor ochiuri în scopul transpunerii imaginii alb/negru de pe filmul fotografic într-o imagine cu ochiuri obturate, respectiv libere, pe sită. În acest scop, pe sita nouă (avînd toate ochiurile libere) se aplică

mai întîi un strat fotosensibil din FOTOREZIST care este expus la lumină prin intermediul fotoşablonului pozitiv (conţinînd configuraţia cablajului imprimat). În ochiurile iluminate, fotorezistul polimerizează şi se întăreşte (fixîndu-se pe sită şi obturîndu-i ochiurile), în timp ce în zonele neiluminate fotorezistul poate fi îndepărtat (prin spălare cu apă caldă) permiţînd reapariţia ochiurilor libere. Astfel, sita devine un „negativ" conţinînd imaginea cablajului imprimat.

În etapa următoare, se transpune (imprimă) această imagine pe folia de cupru a semifabricatului placat.

Pentru aceasta, se pune sita în contact direct cu folia, iar pe cealaltă faţă a sitei se aplică vopsea/cerneală serigrafică prin întindere — pe întreaga suprafaţă a sitei — cu ajutorul unei raclete (şpaclu) speciale (fig. 4.10). Translatînd această racletă, cerneala serigrafică va pătrunde prin ochiurile rămase libere ale sitei, imprimîndu-se pe folia de cupru — zona ochiurilor obturate rămînînd neacoperită cu cerneală.

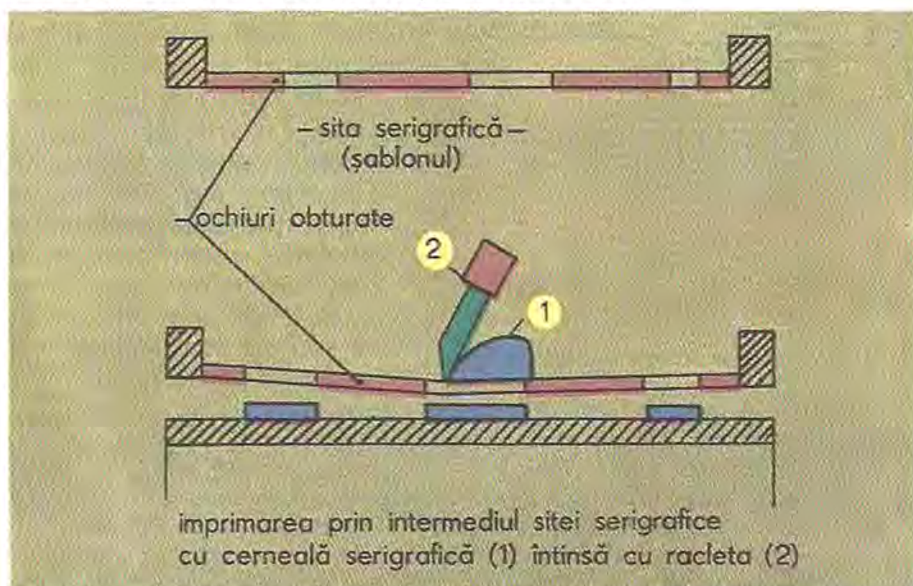


Fig. 4.10. Principiul imprimării serigrafice

Astfel se obţine pe folia de cupru o imagine „pozitivă" şi în relief a cablajului imprimat, realizată cu ajutorul vopselei/cernelei serigrafice. După uscarea acesteia, se realizează corodarea şi celelalte operaţii indicate la metoda fotografică (§ 4.4.1).

În producţia de serie — conform metodei serigrafice — a cablajelor imprimate, se utilizează maşini specializate — manuale, semiautomate sau automate.

4.5. REALIZAREA FOTOORIGINALULUI

Configuraţia cablajului imprimat de realizat este transpusă pe folia de cupru a semifabricatului — printr-una din metodele mai sus indicate — ple-



Fig. 4.11. Moduri de realizare a fotooriginalului.

cînd de la un fotoşablon („film fotografic" sau „mască") ce se obţine, la rîndul lui, prin fotografierea configuraţiei originale a cablajului imprimat.

Prin fotooriginal se înţelege acest suport informaţional al configuraţiei cablajului imprimat de realizat. Modalităţile actuale de realizare a unui fotooriginal pentru cablaje imprimate sînt prezentate în fig. 4.11.

De regulă, fotooriginalul este un desen la scară mărită (2:1 ... 4:1) al cablajului şi realizat pe o hîrtie specială care asigură atît stabilitatea dimensională cît şi contrastul necesar fotografierii. Executarea desenului implică de fapt proiectarea cablajului imprimat — proces relativ complex, ce se realizează fie manual, fie automatizat („proiectare asistată de calculator"), respectînd anumite reguli.

Plecînd de la schema de principiu şi parametrii electrici ai blocului funcţional pentru care trebuie proiectat cablajul imprimat, se realizează:

— poziţionarea componentelor — în funcţie de tipul, rolul, caracteristicile şi dimensiunile lor — determinîndu-se locul punctelor de implantare a terminalelor acestora (ce corespund viitoarelor găuri ale cablajului);

— determinarea traseelor conductoare de interconectare a componentelor — stabilind poziţia, lăţimea, lungimea şi distanţele relative ale acestora (fără ca traseele să se intersecteze în acelaşi plan);

— amplasarea găurilor de fixare mecanică (a unor componente pe placă şi a plăcii în aparat)

Regulile şi recomandările de proiectare a cablajelor imprimate sînt prezentate detaliat în lucrările [2] şi [28]. Principalele aspecte ce trebuie avute în vedere sînt următoarele:

— găurile pentru terminalele componentelor se plasează în nodurile unei reţele (imaginare) avînd pasul de 2,5 mm;

— diametrele acestor găuri au valori normalizate: 0,8 mm; 1,3 mm şi 2 mm;

— lăţimea traseelor conductoare depinde de intensitatea curentului prin ele, de temperatura mediului ambiant şi de grosimea foliei de cupru (0,35 μm sau 0,70 μm, standardizat);

— distanţa minimă între 2 trasee conductoare învecinate este determinată de diferenţa de potenţial dintre acestea;

— pentru reducerea la minimum a posibilelor influențe reciproce, se amplasează cît mai distanțat — grupate separat — traseele de semnal mic și cele de semnal mare, căile de joasă frecvență și cele de înaltă frecvență etc.;

— conductorul de masă se realizează distinct de celelalte conductoare imprimate, avînd, de preferință, o lățime cît mai mare.

În cazul unor subansamble electronice echipate cu circuite integrate digitale, în proiectarea cablajelor imprimate aferente se va ține cont și de *regulile specifice* prezentate în [28].

Avînd în vedere toate aceste considerente, se realizează mai întîi o schiță preliminară de montaj pe baza căreia — după optimizarea și definitivarea tuturor pozițiilor și dimensiunilor — se execută fotooriginalul.

Pe desenul fotooriginalului se reprezintă traseele conductoare și toate găurile (pentru componente și fixare) — fie prin trasare cu tuș negru, fie prin lipirea unor elemente adezive, special concepute (ca de ex.: segmente de traseu de diferite lățimi și lungimi, drepte sau curbe, „pastile de lipire" — pentru diferite tipuri de componente etc.).

Utilizarea elementelor adezive este foarte eficientă întrucît permite realizarea rapidă și estetică a fotooriginalului. În cazul unicatelor (inclusiv al cablajelor experimentale), unele tipuri de elemente adezive pot fi fixate direct pe folia de cupru — înainte de corodare — preluînd rolul protector al fotorezistului (de la metoda fotografică) sau al cernelii serigrafice (de la metoda serigrafică).

În absența unor astfel de elemente adezive și numai în cazul unicatelor, desenul cablajului imprimat poate fi realizat și direct pe folia de cupru (fără fotooriginal și fotoșablon), utilizînd lichide speciale (ca de ex.: tușul carmin, lacul diluat cu tiner, tinctura de cositorit) rezistente la acțiunea clorurii ferice din baia de corodare.

Aceasta este „metoda manuală" de realizare a desenului cablajului imprimat pe folia de cupru. O variantă a sa, permițînd producția economică și în serie mică a cablajelor imprimate fără fotografiere/serigrafiere, constă în utilizarea unui șablon (din hîrtie, preșpan sau foiță metalică) și vopsirea foliei de cupru prin acesta — cu ajutorul unei pensule sau al unui pulverizator.

În afară de fotooriginal („desen de cablaj") documentația tehnică necesară producției în serie a unei plăci de cablaj imprimat include [28]: desenul de bază, desenul de poziționare a găurilor, desenul de acoperire selectivă, desenul de poziționare (sau de inscripționare), desenul de echipare.

4.6. REALIZAREA CABLAJELOR IMPRIMATE MULTISTRAT

În prezent există cîteva sute de metode pentru realizarea cablajelor imprimate multistrat, diferența dintre ele constînd, în principal, din modul de realizare a conexiunilor electrice la straturi.

Practic, se utilizează două grupe de procedee de interconectare (fig. 4.12):

a) procedeele *chimice* („de galvanizare")

b) procedeele *mecanice* (prin sudură, lipire, nituire)

Peste 80% din cablajele multistrat produse în prezent în lume sînt realizate pe baza procedeelor chimice care prezintă următoarele avantaje:

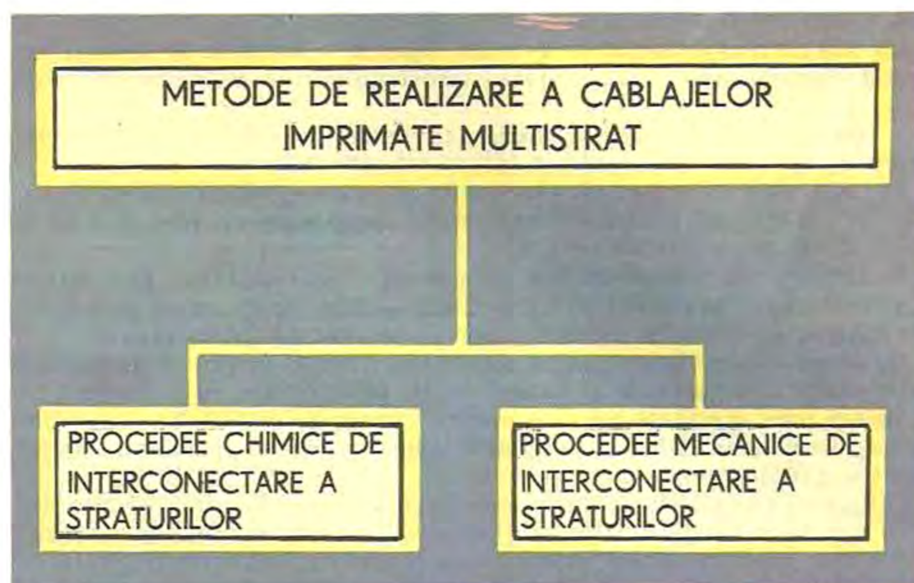


Fig. 4.12. Metode de realizare a cablajelor imprimate multistrat.

— permit interconectarea unui mare număr de straturi
— asigură o densitate ridicată de montaj a componentelor electronice.
— sînt compatibile cu automatizarea.

Diferențele existente între cele două grupe de procedee din punct de vedere al obținerii unei găuri metalizate reies și din fig. 4.13, care prezintă

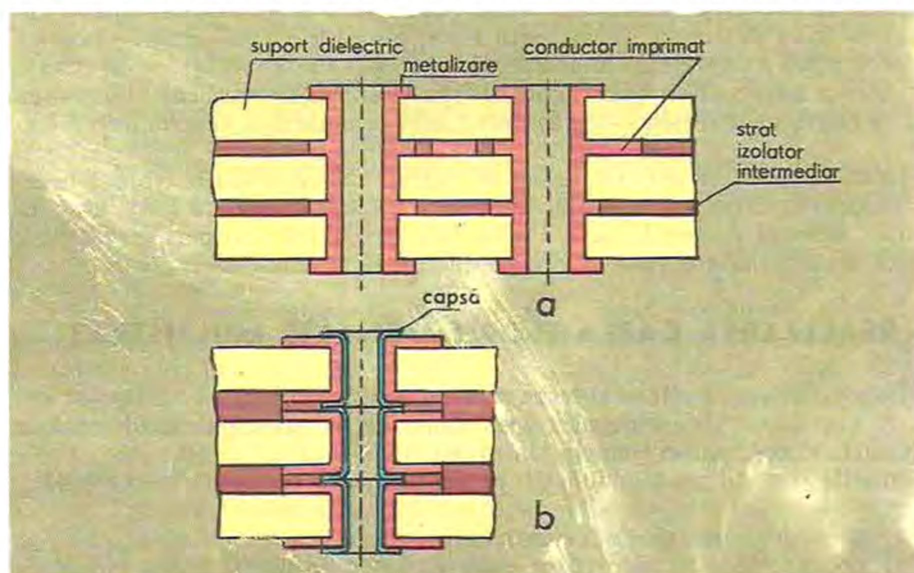


Fig. 4.13. Tipuri uzuale de cablaje imprimate multistrat.

structura unui cablaj cu 2 straturi conductive cuprinse între 3 straturi izolante („suporturi dielectrice"). Unele găuri sînt în contact cu primul strat, iar altele cu al doilea strat — conectarea realizîndu-se prin procedee chimice (fig. 4.13 *a*) sau prin procedee mecanice (fig. 4.13. *b*).

Cel mai răspîndit procedeu mecanic de „metalizare" a găurilor constă în introducerea unor capse metalice (avînd lungimea puţin mai mare decît grosimea stratului izolant — v. fig. 4.13 *b*) în găurile cablajului finit, urmată de bercluirea (răsfrîngerea) ambelor extremităţi ale capsei.

Este evident că acest procedeu comportă numeroase inconveniente: este laborios şi puţin fiabil (întrucît probabilitatea unui contact perfect între capsă şi conductorul imprimat este destul de redusă), implică toleranţe foarte strînse pentru găuri şi capse, necesită un consum relativ ridicat de materiale (capse) etc.

În consecinţă, este mai avantajoasă realizarea pe cale chimică a cablajelor imprimate multistrat (şi a găurilor metalizate respective). Acest proces tehnologic este ilustrat de fig. 4.14 ... 4.18, pentru un cablaj multistrat avînd 5 straturi conductive (2 — exterioare, 3 — interioare) din folie de cupru (depusă pe un suport izolant) şi 4 straturi izolatoare intermediare (necesare pentru lipire, izolare şi rigidizare), v. fig. 4.14 *a*.

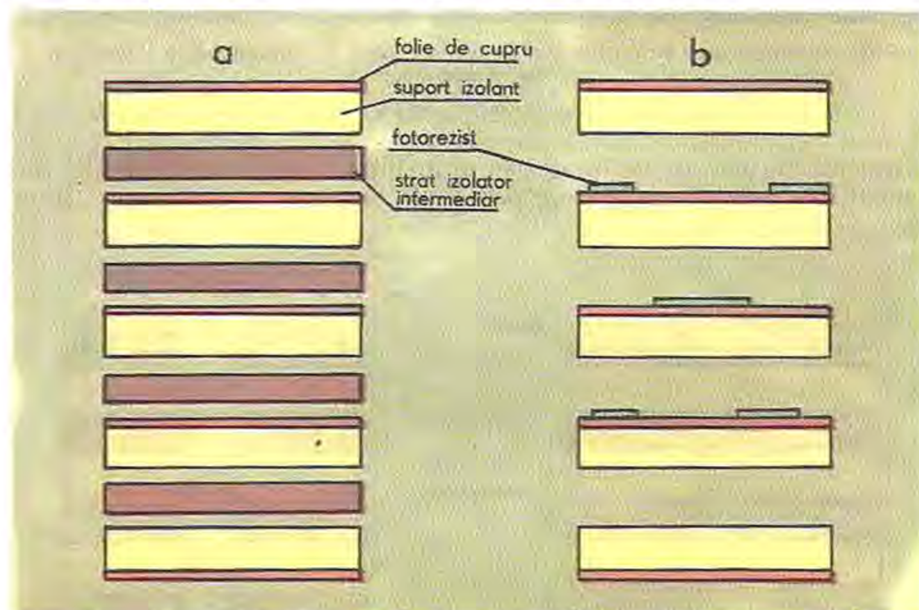


Fig. 4.14. *a*) Elemente componente ale unui cablaj multistrat. *b*) Pregătirea suprafeţei straturilor conductive interioare.

Numărul straturilor conductive (de obicei între 4 şi 20) constituie unul din parametrii importanţi ai cablajului imprimat multistrat. În general, cu cît acest număr este mai mare, cu atît cablajul realizat este mai compact, iar lungimea totală a conductoarelor sale imprimate este mai mare. Numărul straturilor este totuşi limitat de complexitatea şi preţul de cost al cablajului multistrat obtenabil.

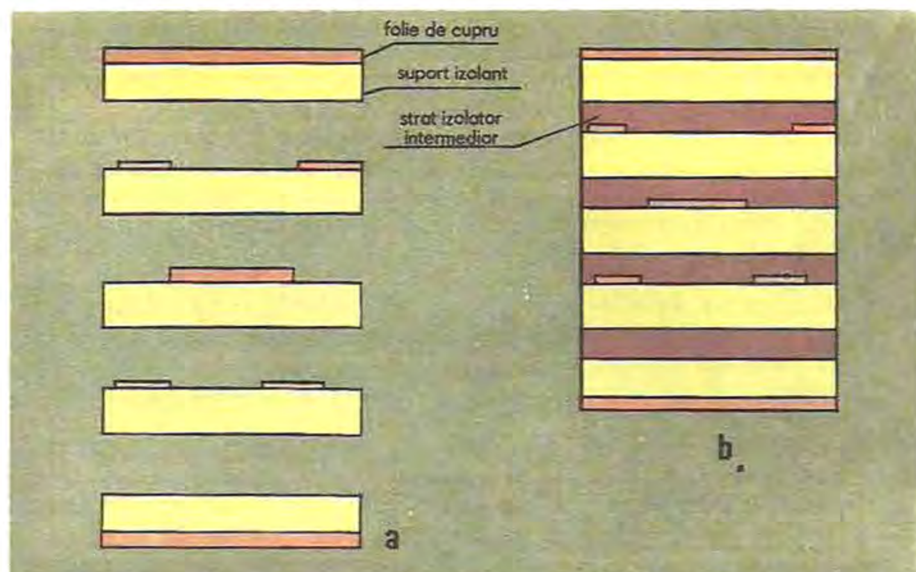


Fig. 4.15. *a*) Prelucrarea straturilor conductive interioare. *b*) Suprapunerea şi presarea tuturor straturilor.

Cele 5 straturi conductive (cu suportul lor izolant) se prelucrează iniţial separat, începînd cu straturile interioare (fig. 4.14 *b*) ale căror folii de cupru sînt acoperite selectiv cu fotorezist (utilizînd 3 fotoşabloane diferite, corespunzătoare celor 3 configuraţii de circuit necesare) şi prelucrate conform metodei fotografice.

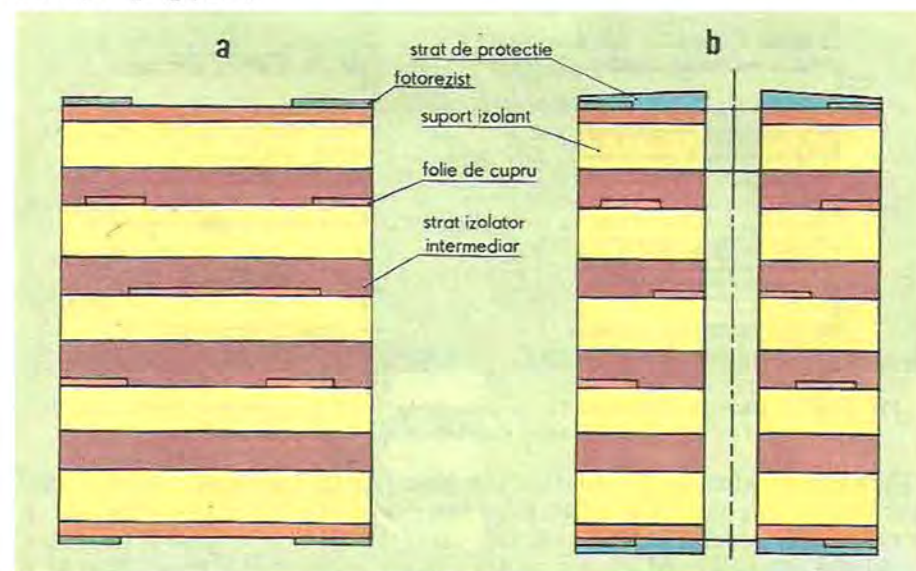


Fig. 4.16. *a*) Prelucrarea straturilor conductive exterioare. *b*) Găurirea ansamblului de straturi.

După corodare şi îndepărtarea stratului de fotorezist, straturile conductive interioare se prezintă schematic ca în fig. 4.15 *a*.

Urmează „asamblarea“ celor 5 straturi conductive cu cele 4 straturi izolatoare intermediare — prin suprapunere şi presare (fig. 4.15 *b*), pentru a forma o structură unitară, „cablajul multistrat“.

Întrucît cele 2 straturi conductive exterioare au rămas neprelucrate, în etapa următoare (fig. 4.16 *a*) se realizează şi acoperirea selectivă, cu fotorezist, a foliilor de cupru respective (utilizînd alte 2 fotoşabloane diferite, ce corespund configuraţiilor circuitelor de realizat în aceste straturi), operaţie după care acestea sînt prelucrate conform metodei fotografice.

Dar corodarea straturilor exterioare nu se poate realiza decît după prelucrarea găurilor traversînd ansamblul celor 5 straturi. În acest scop, este necesară protejarea prealabilă a straturilor conductive exterioare (cu fotorezist depus pe ele) prin acoperirea acestora cu un strat (lac) de protecţie — operaţie după care se poate efectua găurirea transversală a ansamblului (fig. 4.16 *b*).

Urmează îndepărtarea unui strat tubular de material dielectric din interiorul găurilor (corespunzînd suporturilor izolante şi straturilor izolatoare intermediare), astfel încît unul din straturile conductive intermediare (de ex.-al 2-lea în fig. 4.17 *a*) să iasă puţin în relief, depăşind profilul longitudinal al găurii.

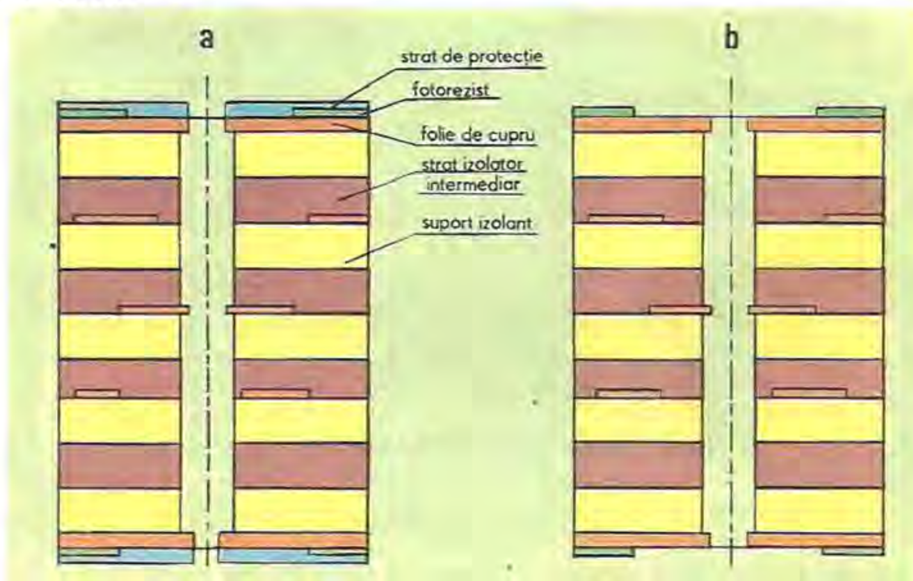


Fig. 4.17. *a*) Prelucrarea găurilor prin îndepărtarea unui strat tubular de material dielectric. *b*) Îndepărtarea stratului de protecţie şi metalizarea găurilor.

În continuare, după îndepărtarea stratului (lacului) de protecţie de pe straturile conductive exterioare, se realizează metalizarea cu cupru, pe cale chimică, a găurilor — atît în interiorul lor cît şi la extremităţi (fig. 4.17 *b*) — realizîndu-se astfel contactul electric dintre stratul conductiv intermediar şi straturile conductive exterioare. (Este evident că se poate realiza astfel şi un contact electric între mai multe straturi intermediare.)

Pentru îngroşarea stratului de cupru depus în interiorul găurii prin metalizare chimică, în continuare se efectuează şi o metalizare galvanică a acesteia — mai întîi tot cu cupru şi apoi, pentru protejare, cu aliaj Sn-Pb, Sn-Ni (sau chiar cu aur — în cazul unor cablaje mai pretenţioase) — conform fig. 4.18 *a*. De remarcat că prin această metalizare galvanică se realizează şi o îngroşare a straturilor conductive exterioare, în zonele extremităţilor găurii.

Abia acum se poate finaliza şi prelucrarea straturilor conductive exterioare prin corodare, operaţie după care fotorezistul este îndepărtat din zonele protejate ale acestor straturi (fig. 4.18 *b*). De menţionat că, în general, extremităţile găurilor metalizate sînt izolate electric de traseele straturilor conductive exterioare (dacă schema de principiu corespunzătoare cablajului imprimat multistrat nu impune altfel).

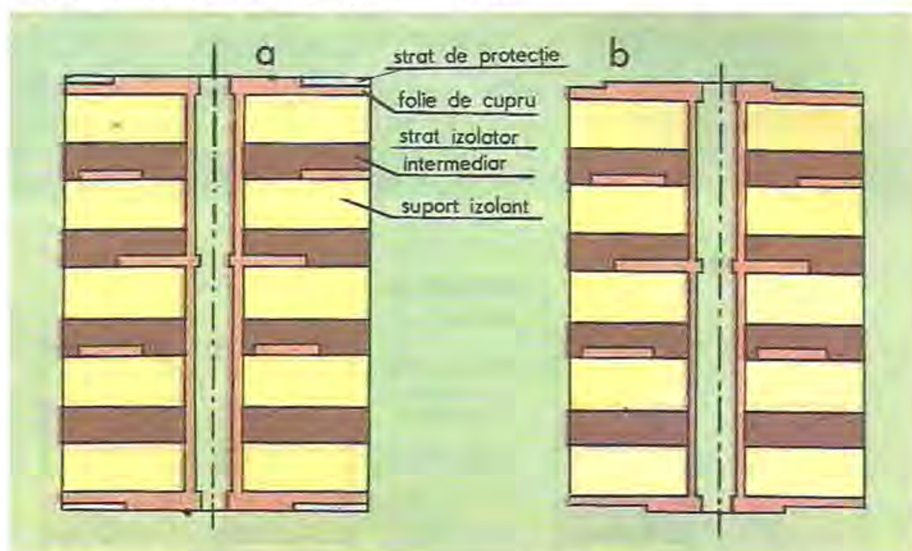


Fig. 4.18. *a*) Metalizarea galvanică — cu cupru şi aliaj — a găurilor. *b*) Corodrea selectivă a straturilor exterioare şi îndepărtarea stratului de fotorezist protector.

4.7. MODELE DE CABLAJE IMPRIMATE

Pentru exemplificare, se prezintă în final cîteva modele de cablaje imprimate, corespunzătoare principalelor etape de realizare a lor pe baza metodei serigrafice — cea mai utilizată industrial. Astfel, în fig. 4.19 este fotografiată, înainte de corodare, faţa acoperită (prin serigrafiere) a unui semifabricat placat cu cupru. După corodare, cuprul din zonele neprotejate este eliminat, iar zonele acoperite cu cerneală serigrafică rămîn, constituind configuraţia cablajului imprimat de realizat.

Imaginea acestui cablaj — după spălarea cernelii serigrafice din zonele protejate — este prezentată în fig. 4.20. De remarcat apariţia suportului izolant (din pertinax — de culoare roşiatică) în zonele neprotejate din fig. 4.19. Zonele mai late, rămase acoperite cu cupru, reprezintă de obicei conductorul de masă al circuitului imprimat. Toate traseele conductoare (inclu-

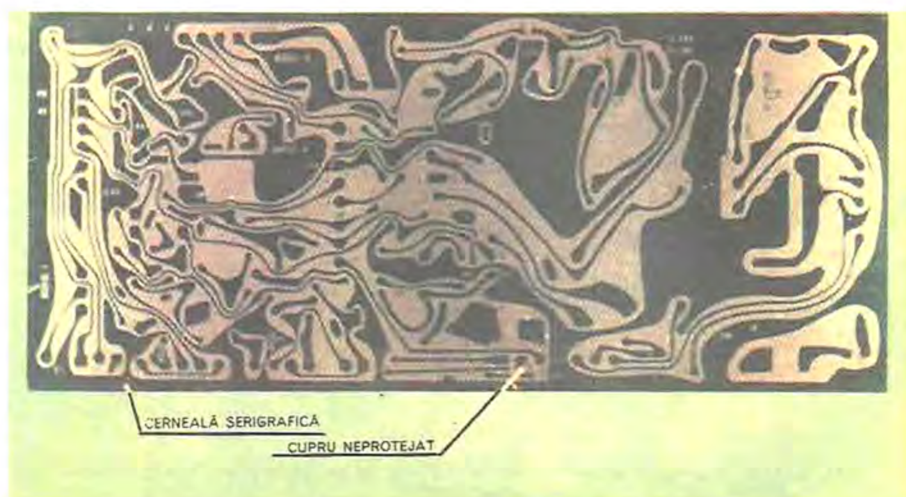


Fig. 4.19. Semifabricat placat cu cupru și acoperit cu cerneală serigrafică.



Fig. 4.20. Cablaj imprimat, imediat după corodare.

siv conductorul de masă) se acoperă cu un lac protector special — termorezistent și în general colorat — permițînd, „cositorirea selectivă" a cablajului (după găurire și implantarea componentelor, v. fig. 4.21), în scopul fixării simultane a tuturor terminalelor acestora — de exemplu prin lipire într-o baie de aliaj de lipit.

Acoperirea selectivă cu lac protector a porțiunilor pe care nu trebuie să se depună aliajul de lipit din baie are — pe de o parte — rolul de-a economisi aliajul și de-a evita apariția unor punți conductoare între trasee

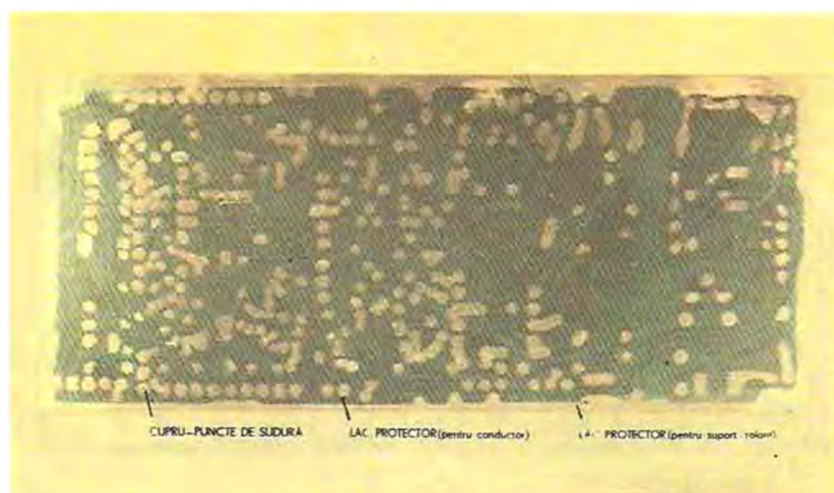


Fig. 4.21. Cablaj imprimat acoperit selectiv cu lac în vederea realizării „cositoririi selective".

vecine ale cablajului, iar — pe de altă parte — constituie un mijloc eficient de protejare a suprafețelor metalice ale cablajului contra coroziunii.

Operația de cositorire selectivă a cablajelor este considerabil facilitată prin precositorirea cablajelor — înainte de implantarea componentelor (fig. 4.22). Se realizează astfel și o protecție anticoroziune a suprafețelor rămase neacoperite cu lac.

În general, fața cablajului pe care se montează componentele este și ea imprimată — tot prin serigrafiere, dar cu cerneală de culoare deschisă — în scopul inscripționării codurilor/valorilor componentelor de montat

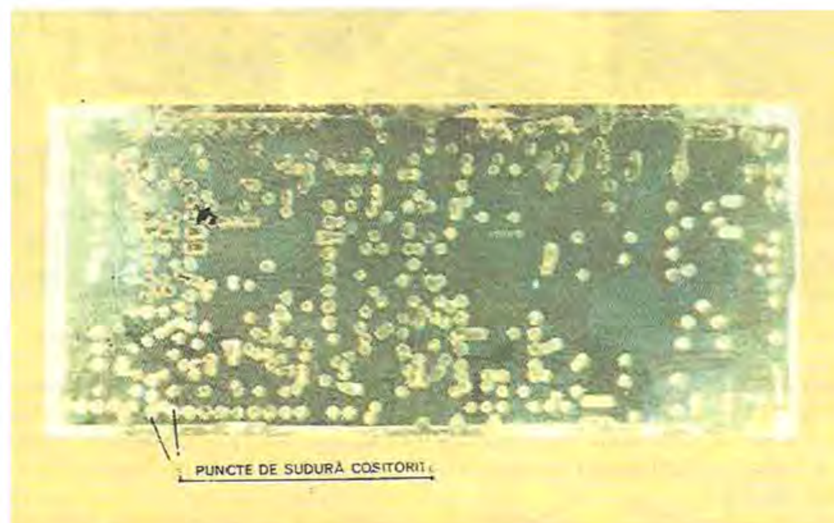


Fig. 4.22. Cablaj imprimat precositorit.

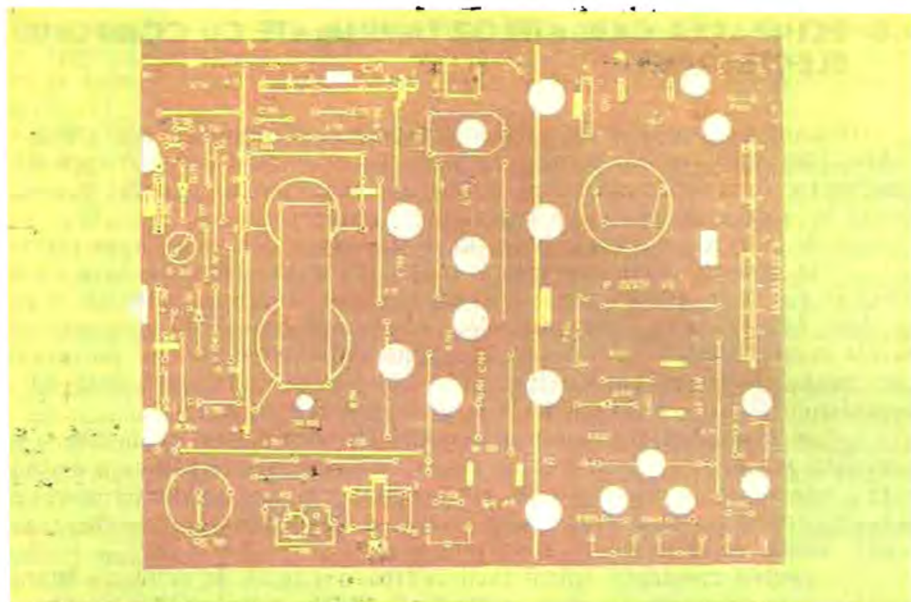


Fig. 4.23. Cablaj imprimat inscripţionat/desenat pe faţa de amplasare a componentelor.

(eventual şi al desenării contururilor acestora) pentru a facilita atît poziţionarea cît şi identificarea/localizarea componentelor respective (v. fig. 4.23).

După montarea prin lipire a componentelor, cablajul imprimat poate arăta ca în fig. 4.24 (faţa cu componente).

S-au notat: *C*=condensator; *T*=tranzistor; *R*=rezistor.

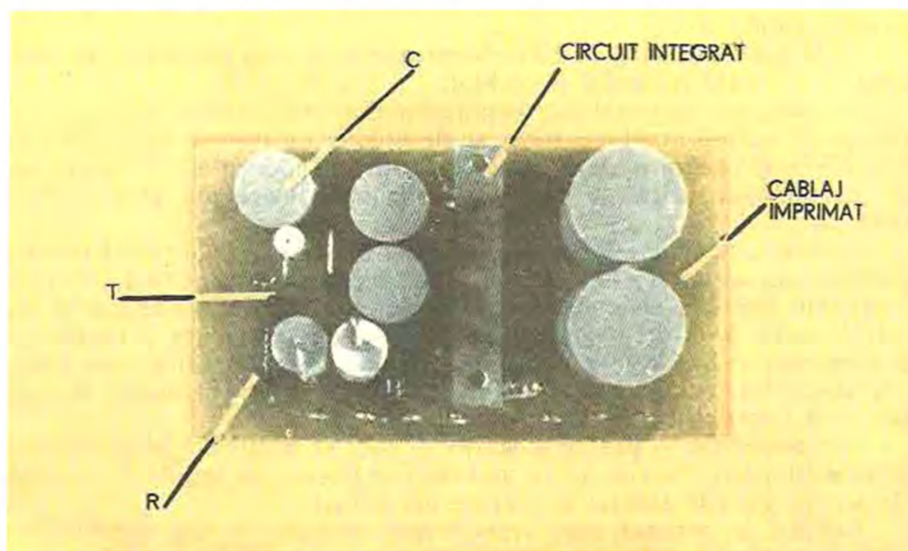


Fig. 4.24. Cablaj imprimat echipat cu componente electronice.

4.8. ECHIPAREA CABLAJELOR IMPRIMATE CU COMPONENTE ELECTRONICE

Înainte de lipirea terminalelor componentelor pe fața placată a unui cablaj imprimat, se efectuează amplasarea și implantarea componentelor electronice în găurile acestuia — operații realizate în general manual și avînd în vedere următoarele reguli/recomandări:

— în fiecare gaură a cablajului se introduce doar un singur terminal;

— în general, componentele se montează în poziție orizontală, cu marcajul în sus și în același sens — pentru a facilita citirea codurilor marcate și, deci, identificarea componentelor. (În cazul necesității asigurării unei foarte mari densități de montare a componentelor, acestea se pot plasa — prin modul de proiectare a cablajului — în poziție verticală; soluția nu este recomandată întrucît implică unele probleme tehnologice);

— corespondența dintre tipul/codul componentei de implantat și locul prevăzut acesteia pe placă trebuie respectată cu strictețe pentru a evita operațiile ulterioare de depanare. De asemenea, se va acorda atenție unicei poziționări corecte posibile a anumitor componente (circuite integrate, tranzistoare, diode, condensatoare electrolitice etc.);

— pentru creșterea (pînă la dublare) a vitezei de echipare manuală a plăcilor cu componente este necesară formarea prealabilă a terminalelor prin tăierea și îndoirea acestora la forma cea mai avantajoasă pentru montare și contactare (de exemplu există cel puțin 10 modalități de formare a terminalelor axiale, fiecare avînd diverse grade de dificultate a operațiilor de formare, implantare, mînuire, lipire, depănare specifice [2]);

— în funcție de tipul componentei de montat și pentru a-i reduce solicitarea termică (în procesul de lipire), se recomandă acele modalități de formare a terminalelor care asigură atît o distanță suficientă a componentei față de placa imprimată cît și o lungime suficientă a terminalelor (permițînd disipația căldurii).

— în toate cazurile, îndoirea terminalelor pe fața placată se va efectua numai în direcția traseelor de cablaj;

— îndoirea terminalelor componentelor nu trebuie efectuată prea aproape de corpul acestora, iar raza de îndoire nu trebuie să fie prea mică (sub 1,5 mm) pentru a nu afecta integritatea componentelor și terminalelor lor. În toate cazurile, se va evita solicitarea mecanică prea intensă a acestora.

Formarea terminalelor se poate realiza manual — cu dispozitive simple, specifice, sau automat — cu echipamente specializate, asigurînd o mare productivitate. Există și sisteme de echipare automată a plăcilor de cablaj imprimat, deosebit de eficiente în cazul producției de serie mare și foarte mare. În asemenea cazuri este recomandabilă integrarea operațiilor de formare a terminalelor, echipare a plăcilor și lipire a componentelor, în cadrul unor linii tehnologice automate complexe.

Componentele — pasive și active — care se montează pe cablajele imprimate (după realizarea lor ca mai sus) se fixează de regulă prin terminalele lor, în găurile special prevăzute din cablaj.

Întrucît, în general, dispozitivele semiconductoare sînt sensibile la șoc termic — putînd fi distruse la lipire — este recomandabilă fixarea circuitelor integrate pe cablaj prin intermediul unor socluri speciale care se lipesc pe

cablaj (în cazul diodelor şi al tranzistoarelor lungimea mai mare a terminalelor asigură o disipare importantă a căldurii transmise de la punctele de lipire pe cablaj, uneori acest proces fiind accelerat cu ajutorul unei pensete metalice).

Componentele mai voluminoase şi mai grele (condensatoare electrolitice şi variabile, transformatoare, comutatoare, conectoare, radiatoare etc.) se fixează adecvat pe cablaj şi cu ajutorul unor piese mecanice corespunzătoare (şuruburi şi piuliţe, coliere, suporturi/socluri speciale etc.).

Structura cablajelor imprimate permite şi realizarea unor componente pasive direct pe cablaj (prin folia de cupru şi suportul său izolant): rezistoare, condensatoare şi — mai frecvent — bobine (v. § 3.3). Este evident că domeniile de valori şi aplicaţii ale unor asemenea componente sînt relativ restrînse.

În ultimul timp se utilizează pe scară din ce în ce mai largă componentele cu montaj superficial (SMD — Surface Mounted Devices), fără terminale, dar permiţînd montajul pe cablaj prin lipirea anumitor zone metalizate de pe corpul lor direct pe acesta. Principalele avantaje ale acestor componente constau în eliminarea operaţiilor de formare a terminalelor şi în obţinerea unei fiabilităţi superioare în exploatare prin creşterea rezistenţei la solicitări mecanice.

Capitolul 5

FIABILITATEA COMPONENTELOR PASIVE

5.1. NOŢIUNI DE FIABILITATE

Fiabilitatea unui produs reprezintă, din punct de vedere calitativ, proprietatea acestuia de a-şi conserva performanţele în limite stabilite, într-un anumit interval de timp şi în condiţii determinate, [3]. Din punct de vedere cantitativ, fiabilitatea este descrisă de un ansamblu de indicatori, cu ajutorul cărora se poate prevedea comportarea produsului în condiţii specificate şi se poate anticipa momentul defectării sale. Aceşti indicatori sînt:

— funcţia de fiabilitate $R(t)$: reprezintă probabilitatea ca un produs să funcţioneze fără defectare în intervalul $(0, t)$, în condiţii determinate:

$$R(t)=P(T>t)$$

unde T reprezintă durata de funcţionare pînă la defectare;

— funcţia de repartiţie a duratei de funcţionare pînă la defectare $F(t)$: reprezintă probabilitatea ca produsul să se defecteze înainte de momentul t:

$$F(t)=P(T\leqslant t)$$

Cele două funcţii sînt complementare:

$$R(t)+F(t)=1$$

— densitatea de probabilitate $f(t)$ a duratei de funcţionare pînă la defectare se defineşte astfel:

$$f(t)=\frac{dF(t)}{dt}=-\frac{dR(t)}{dt}$$

— intensitatea (rata) defectărilor $\lambda(t)$ este un parametru de fiabilitate foarte important care caracterizează componentele electronice, şi care se poate defini în funcţie de parametrii anteriori prin relaţiile:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)}$$

Relația dintre $\lambda(t)$ și $R(t)$ se poate pune și sub forma:

$$R(t)=e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

Pentru cazul particular $\lambda(t)$ = constant, relația de mai sus devine:

$$R(t)=e^{-\lambda t}.$$

Pentru un circuit electronic, rata de defectare totală este dată de suma ponderată a ratelor de defectare ale tuturor componentelor conținute în circuitul considerat:

$$\lambda_{tot}=\sum_{i=1}^{k} n_i\lambda_i$$

unde: k=numărul de tipuri de componente conținut în circuit;
n_i=numărul de componente de același tip i din circuit.
În același mod, adunînd ratele de defectare ale fiecărui circuit, se află rata de defectare pentru un aparat electronic sau pentru o instalație complexă.

Realizarea de componente fiabile implică o analiză completă a comportării acestora în exploatare și în cadrul încercărilor de fiabilitate; este necesar să se cunoască principalele moduri și mecanisme de defectare a componentelor utilizate în sistemele electronice.

Prin *mod de defectare* al unei componente se înțelege condiția sau parametrul de stare observabil sau măsurabil al acesteia, care explică nefuncționarea componentei în sistem; prin *mecanism de defectare* se înțelege modificarea chimică, fizică și mecanică sau condiția care produce modul de defectare observat, [4].

5.2. FIABILITATEA REZISTOARELOR

Rezistoarele sînt componentele frecvent utilizate (numărul lor reprezintă 30÷40% din numărul total al componentelor unui aparat), a căror fiabilitate determină în mod esențial fiabilitatea circuitului (ansamblului) din care fac parte; pe baza datelor statistice experimentale s-a observat că defecțiunile datorate rezistoarelor reprezintă în medie aproximativ 15% din numărul total al defecțiunilor unui echipament electronic.

Fiabilitatea diferă pentru diferite categorii de rezistoare: utilizînd ca indicator calitativ de fiabilitate valoarea medie a ratei defectărilor, λ, se poate alcătui tabelul 5.1.

Tabelul 5.1.

Valorile medii ale ratelor de defectare λ pentru rezistoare

Tipul rezistorului	$\lambda_{mediu}(10^{-6}.h^{-1})$
— rezistor cu peliculă metalică sau din oxizi metalici	0,05
— rezistoare cu peliculă de carbon	0,1
— rezistoare bobinate	0,2
— rezistoare variabile	4

Pe baza acestor date se observă că cele mai fiabile sînt rezistoarele cu peliculă metalică sau oxizi metalici, utilizarea lor în aparatura electronică profesională fiind astfel perfect justificată. Rezistoarele variabile — datorită

existenței contactului mobil și a unor piese mecanice în mișcare — sînt mai puțin fiabile.

În calculele de fiabilitate, valorile ratelor de defectare ale componentelor se multiplică cu coeficienți de corecție K_{el} care țin cont de solicitările electrice și termice, și cu coeficienți K_m, care țin cont de solicitările mecanice ale componentelor.

Tabelul 5.2

Moduri și mecanisme de defectare a rezistoarelor

Tipuri de solicitare	Mecanism de defectare	Modul de defectare care rezultă	Tip de rezistor: cu peliculă de carbon	cu peliculă metalizată sau oxizi metalici	bobinat
A. *Solicitare electrică*					
tensiune excesivă	deteriorarea sau străpungerea elementului rezistiv sau izolației	rezistență modificată	X	X	X
		rezistență întreruptă	X	X	X
		rezistență scurt-circuitată	XX	XX	XX
putere disipată excesivă	deteriorarea elementului rezistiv	rezistența modificată	X	X	X
		rezistența întreruptă	X	X	X
B. *Ambianță*					
șocuri, vibrații sau accelerație constantă	deteriorarea elementului rezistiv sau a elementului de fixare	rezistență întreruptă	X	X	X
temperatură înaltă	deteriorarea elementului rezistiv sau a izolației	rezistență modificată	X	X	X
șoc termic	deteriorarea elementului rezistiv	rezistență modificată	X	X	X
		rezistență întreruptă	X	X	X
umiditate ridicată	deteriorarea elementului rezistiv	rezistență întreruptă	X	X	X
	coroziune	rezistență întreruptă	X	X	X
	scurgere la suprafață	rezistență întreruptă	X	X	X
atmosferă corozivă	coroziune	rezistență întreruptă	X	X	X
	scurgere la suprafață	rezistență modificată	X	X	X

XX: depinde de construcție sau de materialul de acoperire

Defecţiunile rezistoarelor fixe, determinate de solicitări electrice ca şi de factori de mediu, depind de tipul rezistorului. În tabelul 5.2 sînt evidenţiate mecanismele şi modurile de defectare ale principalelor tipuri de rezistoare fixe, [4].

5.3. FIABILITATEA CONDENSATOARELOR

Condensatoarele sînt frecvent utilizate în aparatura electronică, ponderea lor atinge, în medie 25% din numărul total de componente folosite. S-a estimat că defecţiunile produse de condensatoare reprezintă cam 15% din numărul total al defecţiunilor, un număr mare din acestea datorîndu-se alegerii sau folosirii necorespunzătoare.

Fiabilitatea condensatoarelor este relativ bună şi se apreciază prin rata de defectare λ, care variază de la un tip de condensator la altul, fiind dependentă de condiţiile de lucru electrice, mecanice, de mediu etc. În tabelul 5.3 sînt prezentate valorile medii pentru principalele tipuri de condensatoare (folosite în condiţii nominale de tensiune şi temperatură).

Tabelul 5.3.

Valorile medii ale ratei de defectare pentru condensatoare

Tipul condensatorului	$\lambda_{medie}(10^{-6}h^{-1})$
— condensatoare ceramice	0,1
— condensatoare cu polistiren	0,05
— condensatoare cu polietilentereftalat	0,2
— condensatoare cu hîrtie	1
— condensatoare cu hîrtie metalizată	0,5
— condensatoare electrolitice cu aluminiu semiuscate	5
— condensatoare cu tantal cu electrolit solid	0,1
— condensatoare variabile	5

Condensatoarele variabile şi semivariabile, avînd părţi în mişcare, au fiabilitate mai mică decît a condensatoarelor fixe.

În tabelul 5.4 sînt prezentate modurile şi mecanismele de defectare ale condensatoarelor, [4].

Tabelul 5.4

Moduri şi mecanisme de defectare a condensatoarelor

Tipuri de solicitare	Mecanisme de defectare	Modul de defectare	Tipuri de condensatoare		
			ceramice	hîrtie	electrolitice
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
A. *Solicitare electrică*					
tensiune mai mare cu 125% faţă de normă (rar)	avariere	scurtcircuit	X		X
tensiune mai mare cu 150% faţă de normă (rar)	avariere	scurtcircuit	X	X	X

a	b	c	d	e	f
tensiune continuă excesivă	deteriorare dielectric	scurtcircuit	X	X	X
	curent de scurgere mare				X
	modificare dielectric	modificarea capacității	+		
tensiune alternativă excesivă	supraîncălzire	scurtcircuit	X	X	X
	efect Corona	scurtcircuit	X		
curent alternativ excesiv	supraîncălzire	scurtcircuit	X	X	X
B. *Ambianță* şocuri, vibrații sau accelerare constantă	deteriorare a fixării sau internă	întrerupt sau scurtcircuit	X	X	X
temperatură înaltă	deteriorare dielectric	scurtcircuit	X	X	X
	curent de scurgere mare	scurtcircuit	X	X	X
	modificare dielectric	modificarea capacității	+		
temperatură înaltă	deteriorarea izolației	scurtcircuit	X		
	pierdere electrolit	rezistență serie mare sau întreruptă			X
temperatură joasă	deteriorarea izolației	modificarea capacității		X	
	micşorarea conductivității electrolitului	rezistență serie mare			++
	modificare dielectric	modificarea capacității	+		
încălzire ciclică	deteriorarea izolației	modificarea capacității	X	X	X
	modificare dielectric	modificarea capacității	+		
şoc termic	deteriorarea izolației	scurtcircuit	X	X	X
	deteriorare dielectric	modificarea capacității sau scurtcircuit			X
umiditate ridicată acoperire ermetică acoperire neermetică	scurgere la suprafață	rezistență paralel mică	++	++	++
	scurgere internă	scurtcircuit		X	

Tabelul 5.4 (continuare)

a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
atmosferă corozivă: acoperire ermetică acoperire neermetică	scurgere la suprafaţă	scurtcircuit	X	X	
	coroziune internă	scurtcircuit	X	X	
vid înalt	scurgere exterioară	scurtcircuit	X	X	
	pierdere electrolit	rezistenţă serie mare			X
radiaţii	deteriorare dielectric	scurtcircuit		X	
	ionizare internă	curent de scurgere sau scurtcircuit		X	

\+ supratensiune sau putere disipată peste limita admisibilă
\+\+ depinde de construcţie sau de materialul de acoperire

5.4. FIABILITATEA BOBINELOR

Bobinele sînt elemente cu siguranţă în funcţionare relativ scăzută, defecţiunile lor ducînd şi la defectarea altor componente alăturate. Fiabilitatea bobinelor este destul de variată în funcţie de tipul constructiv al bobinei, de domeniul său de utilizare, de condiţiile de realizare, de modul de întreţinere şi exploatare etc. [3].

Valoarea medie a ratei de defectare este:

— pentru bobine: $\lambda = 0{,}5.10^{-6}h^{-1}$

— pentru transformatoare de joasă frecvenţă: $\lambda = 1.10^{-6}h^{-1}$

Cele mai frecvente moduri de defectare a bobinelor şi transformatoarelor constau în scurtcircuitarea bobinajului datorită mecanismului de străpungere a materialului izolator.

Defectările prin întreruperea bobinajului apar destul de rar; solicitările electrice excesive şi de ambianţă pot duce la străpungerea izolaţiei. De aceea, alegerea clasei de izolaţie corespunzătoare diferitelor tipuri de aplicaţii (cu diferite regimuri termice şi electrice) prezintă o importanţă deosebită pentru fiabilitatea elementelor inductive.

În tabelul 5.5 sînt date mecanismele şi modurile de defectare ale bobinelor şi transformatoarelor.

Tabelul 5.5

Moduri şi mecanisme de defectare pentru bobine şi transformatoare

Tipuri de solicitare	Mecanisme de defectare	Modul de defectare	Bobine	Transformatoare	OBS.
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
A. *Solicitări electrice*					
supratensiune mare	străpungerea instantanee a izolaţiei	scurtcircuitarea bobinajului	X	X	

a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
	efect Corona *1)*	scurtcircuitarea sau întreruperea (rar) a izolației	X	X	*1)* prin eliberare de ozon și încălzire accelerează îmbătrînirea izolației
supratensiune moderată (aprox. 120% față de normă)	grăbește străpungerea prematură a izolației	scurtcircuitarea bobinajului	X	X	
curent excesiv în secundar	supraîncălzire și micșorarea rigidității electrice a izolației	întreruperea sau scurtcircuitarea bobinajului		X	
	deformarea carcasei *2)*	modificarea parametrilor electrici ai bobinajului *2)*		X	*2)* prin dilatarea compoundului de umplere
scăderea frecvenței de intrare sub limita prescrisă	creșterea excesivă a temperaturii *3)*, *4)* și scăderea rigidității electrice a izolației	scurtcircuitarea sau întreruperea bobinajului	X	X	*3)* prin scăderea reactanței și creșterea curentului peste limita prescrisă *4)* prin creșterea pierderilor în miez
creșterea frecvenței de intrare peste limita prescrisă		scurtcircuitarea sau întreruperea bobinajului			
B. *Ambianță*					
șocuri, vibrații sau accelerație constantă	deformarea carcasei sau bobinajului	modificarea parametrilor electrci	X	X	
	deteriorarea fixării	circuit întrerupt	X	X	
temperatură înaltă	deteriorarea izolației	modificarea parametrilor electrici	X	X	
		scurtcircuitarea sau întreruperea bobinajului	X	X	
umiditate ridicată	coroziune	întreruperea bobinajului	X	X	
	scurgere la suprafață	micșorarea factorului de calitate	X		
atmosferă corozivă	coroziune	întreruperea bobinajului	X	X	
	scurgere la suprafață	micșorarea factorului de calitate	X		
radiații	deteriorarea izolației	scurtcircuitarea bobinajului	X	X	

5.5 FIABILITATEA CABLAJELOR IMPRIMATE ECHIPATE CU COMPONENTE

Întrucît principala funcție a cablajelor imprimate constă în interconectarea componentelor din circuitele electronice, fiabilitatea acestora este determinată, în mod esențial, de calitatea conexiunilor prin lipire efectuate între terminalele componentelor și traseele cablajului.

Valoarea medie a intensității (ratei) de defectare λ [10^{-6}/h] a conexiunilor prin lipire este indicată în normativele de fiabilitate (în scopul determinării fiabilității previzionale) ca fiind de ordinul 0,2 (pentru lipirea manuală) sau 0,05 (pentru lipirea automată). Dar din analiza statistică a unor date experimentale rezultă valori și mai mici ale acestui indicator (de ordinul 10^{-2} ... 10^{-3}) [2]. Comparativ cu alte procedee de conectare a componentelor pe cablaje (sudura electrică, sertizarea, wraparea), lipirea este apreciată ca fiind suficient de fiabilă pentru echipamentele electronice.

Deși rata de defectare a conexiunilor prin lipire este relativ redusă, datorită numărului lor relativ mare (de ordinul sutelor... miilor — pentru o singură placă de cablaj imprimat) în structura unui echipament electronic (depinzînd de complexitatea acestuia) influența fiabilității conexiunilor asupra fiabilității ansamblului poate fi foarte importantă.

De exemplu, în cazul echipamentelor electronice mobile/portabile, solicitările mecanice (vibrații, șocuri, accelerații/decelerații) și climatice (temperatură, umiditate) aplicate acestora influențează considerabil și în mod defavorabil fiabilitatea conexiunilor prin lipire — aspect ce trebuie luat în considerare la proiectarea și efectuarea conexiunilor prin lipire.

Principalele căi pentru reducerea la minimum posibil a procentului de defecte datorate conexiunilor prin lipire sînt [2]:

— selectarea unor materiale și tehnologii de lipire adecvate;

— existența unei bune sudabilități a suprafețelor de lipire;

— controlarea riguroasă a calității materialelor de lipire și a suprafețelor de lipit (atît înainte de lipire cît și periodic, în cursul procesului de lipire);

— respectarea riguroasă a procesului tehnologic de lipire (implicînd controlul permanent al parametrilor acestuia);

— controlarea calității conexiunilor prin lipire obținute (în principal, prin verificarea aspectului vizual al conexiunilor, cu ajutorul unei lupe speciale, de diametru adecvat și mărind de cel puțin 10 ori).

Astfel, din acest ultim punct de vedere, o conexiune prin lipire corect realizată trebuie să aibă:

— suprafața lipiturii — lucioasă și strălucitoare (fără iregularități, crăpături, asperități etc.);

— forma — tronconică, avînd profil concav și o înălțime maximă (deasupra cablajului) de cel mult 0,5 ... 0,8 din diametrul pastilei de lipire a terminalului;

— aliajul de lipit — acoperind complet și uniform terminalul respectiv (și avînd unghiurile de contact — atît cu terminalul cît și cu pastila de lipire — sub 30°);

— găurile metalizate (în cazul cablajelor dublu-strat și multi-strat) umplute — prin capilaritate — cu aliaj de lipit.

În principiu, orice abatere de la aceste caracteristici ideale poate fi considerată ca un defect — deşi nu orice abatere afectează fiabilitatea plăcii echipate cu componente.

Principalele defecte conducînd la nefuncţionarea (sau funcţionarea defectuoasă) a unei plăci echipate — şi care pot fi identificate prin control vizual — sînt:

a) defecte de formă — de ex. „punţi" şi/sau „stalactite" (datorate excesului de aliaj de lipit aplicat). Primele constituie un defect major întrucît scurtcircuitează trasee/terminale adiacente;

b) defecte de aspect — de regulă datorate umectării necorespunzătoare (sau deumectării) suprafeţei de lipire a cablajului sau terminalului;

c) defecte datorate prelucrărilor mecanice (tăiere, găurire) necorespunzătoare ale cablajelor imprimate: exfolieri, găuri prea mari/mici sau plasate necorespunzător etc. Tensiunile interne produse în placă pot determina defectarea prin oboseală a îmbinărilor lipite;

d) defecte de montaj — datorate terminalelor prea scurte (sau formate necorespunzător) ale componentelor;

e) alte defecte: cavităţi, lipituri „reci"/„galbene"/„grăunţoase"/false/mate, incluziuni, microfisuri, reziduuri albe, curbarea plăcii de cablaj imprimat etc.

Toate aceste defecte posibile — cu cauzele şi consecinţele lor precum şi cu modurile şi mecanismele lor de defectare specifice — sînt prezentate pe larg în lucrarea [2], insistîndu-se asupra măsurilor preventive necesare.

Capitolul 6

TEHNOLOGIA DE MONTARE A COMPONENTELOR PE SUPRAFAȚĂ

Tehnologia de montare a componentelor pe suprafață cuprinde un ansamblu de operații efectuate automat, care au drept rezultat fixarea componentelor electrice miniatură pe suprafața unui circuit imprimat sau pe un substrat de circuit hibrid [25], [27].

Componentele electrice destinate montajului pe suprafață sînt denumite în mod generic în literatura de specialitate „Surface Mounted Devices" (SMD), iar procesul tehnologic de realizare a plăcilor de circuit imprimat (a subansamblurilor) echipate cu astfel de componente este cunoscut sub denumirea de „Surface Mounting Assembley" (SMA) sau „Surface Mounted Technology" (SMT).

Tehnologia de montare a componentelor pe suprafață este o tehnologie nouă, în plină ascensiune, și cîteva date statistice și de prognoză pot sugera ritmul de dezvoltare pentru SMD și SMA. Astfel:

— se estimează că, pînă în 1990, componentele specifice acestei tehnologii vor atinge 50% din totalul componentelor asamblate, iar peste 25 de ani componentele cu terminale se vor utiliza numai în acele aplicații unde nu se pot înlocui din motive tehnice sau economice;

— în realizarea plăcilor de cablaj imprimat (PCI), în prezent, prin folosirea tehnicilor de imprimare și a componentelor deja existente, se pot obține reduceri de suprafață de pînă la 64%; costurile de obținere a PCI echipate scad la jumătate, iar cheltuielile de fabricație se reduc cu pînă la 35%;

— tehnologia automată SMA ajunge în prezent la un nivel al erorilor de poziționare de 10÷20 ppm față de 1 000÷2 000 ppm la plantarea automată a componentelor cu terminale, sau 2 500÷6 000 ppm în cazul plantării manuale;

— productivitatea utilajelor comercializate pentru SMA ajunge la 250 000÷500 000 SMD/oră (1986), ritmurile de fabricație fiind fără precedent în industria electronică de pînă acum;

— în anul 1986 necesarul de SMD a fost:
— pentru S.U.A.: 10·10 bucăți SMD
— pentru Europa: 11,5·10 bucăți SMD
— pentru Japonia: 12·10 bucăți SMD. [26]

În cele ce urmează se vor prezenta numai componentele pasive specifice acestei tehnologii și cîteva reguli de proiectare a cablajelor imprimate aferente; componentele active SMD vor fi tratate în volumul II al seriei „Electronica în imagini".

6.1. COMPONENTE ELECTRONICE PASIVE SMD

Componentelor electronice specifice tehnologiei de montare pe suprafață li se impun următoarele cerințe:

— parametrii electrici trebuie să fie similari componentelor electronice cu terminale;

— dimensiunile componentelor trebuie să fie mult reduse, dar să ofere posibilitatea manevrărilor de către utilaje automate;

— componentele trebuie să reziste la șocuri termice.

6.1.1. REZISTOARE

Rezistoarele sînt fabricate în gama $1\,\Omega \div 10\,M\Omega$, cu toleranțe $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, la puterea de 0,125 W, $U_{max}=200$ V, cu dimensiunile: $L=3{,}2$ mm, $l=1{,}6$ mm, $H=0{,}6$ mm, v. fig. 6.1, (se produc și rezistoare pentru $P_n=0{,}1$ W, dimensiunile lor fiind ceva mai mici: $2{,}0\times 1{,}25\times 0{,}6$ mm). Lățimea suprafeței metalizate, de contact, este de 0,51 mm (pentru $P_n=0{,}1$ W) sau de 0,76 mm (pentru $P_n=0{,}125$ W).

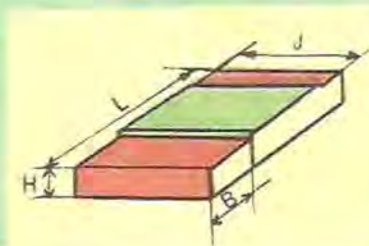


Fig. 6.1. Rezistor: L — lungimea; l lățimea; H — înălțimea; B — lățimea suprafeței metalizate de contact.

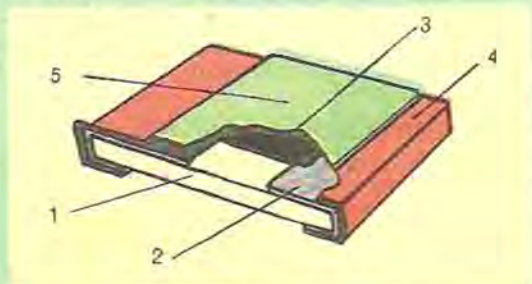


Fig. 6.2. Structura unui rezistor: *1* — suport de alumină; *2* — peliculă de argint-paladiu; *3* — peliculă rezistivă; *4* — strat metalic (electrod extern); *5* — strat de protecție (glazură).

Structura şi tehnologia de obţinere a unui astfel de rezistor sînt similare structurii şi tehnologiei rezistoarelor cu peliculă de oxizi metalici: pe un substrat de alumină (Al_2O_3) de înaltă puritate, *1* (fig. 6.2.), se depun prin serigrafie, la extremităţi, două zone plane din peliculă de argint-paladiu (Ag-Pd), *2*, iar între acestea pelicula rezistivă, *3*. Structura şi grosimea acestei pelicule sînt determinate de valoarea nominală ce se doreşte a fi obţinută, ajustarea efectuîndu-se cu fascicul laser, după fixarea peliculei rezistive prin tratament termic. Urmează apoi depunerea unui strat metalic, *4*, la extremităţile cipului rezistiv, care asigură contactul electric între pelicula rezistivă şi circuitul imprimat şi permite fixarea rezistorului pe placa de cablaj. Pelicula rezistivă este protejată cu un strat de glazură, *5*. Componentele realizate astfel pot să reziste la imersie totală în aliaj de lipit şi au o intensitate (rată) de defectare $\lambda \leqslant 10^{-9}h^{-1}$.

La aceleaşi dimensiuni se fabrică şi o componentă de valoare 0 Ω, folosită în scurtcircuitarea traseelor [25], [26], [27].

Rezistoare în prezentare SMD au fost asimilate şi omologate în ţară la CCSIT - CE, I.C.P.E., I.P.E.E. - Curtea de Argeş.

6.1.2. CONDENSATOARE CERAMICE MULTISTRAT

Condensatoarele ceramice folosite în această tehnologie sînt condensatoare multistrat tip „cip", a căror structură şi tehnologie a fost prezentată în 2.4.1.

Un astfel de condensator este ilustrat în figura 6.3, iar dimensiunile condensatoarelor fabricate la I.P.E.E. - Curtea de Argeş sînt date în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1

Dimensiunile limită ale condensatoarelor ceramice multistrat tip „cip"

Dimensiunea	Valoarea minimă — Valoarea maximă (mm)
$L \pm 0{,}5$	1,27÷5,59
$l \pm 0{,}5$	1,02÷6,35
H_{max}	1,15÷2,56
$B \pm 0{,}25$	0,25÷0,76

Parametrii electrici ai acestor condensatoare fabricate în ţară sînt date în Tabelul 6.2.

Tabelul 6.2

Parametrii electrici ai condensatoarelor ceramice multistrat

Parametrii electrici	Condensatoare ceramice tip *I*	Condensatoare ceramice tip *II*
valoare nominală	3,3pF÷18nF	100pF÷1µF
toleranţă	±(2,5; 5; 10; 20)%	±(5; 10; 20)%

	Condensatoare ceramice tip *I*	Condensatoare ceramice tip *II*
tensiune nominală	50, 100, 200 V_{cc}	50, 100, 200 V_{cc}
tangenta unghiului de pierderi	$tg\,\delta \leq 15 \cdot 10^{-4}$ pt. $C_n \geq 50$ pF; $tg\,\delta \leq 1{,}5\left(\frac{150}{C_n}+7\right)\cdot 10^{-4}$ pt. $5 < C_n \leq 50$ pF	$tg\delta \leq 3.10^{-2}$
rezistența de izolație	$R_{iz} > 10G\Omega$	$R_{iz} > 4G\Omega$ pt. $C_n \leq 25nF$; $\tau = 100s$ pt. $C_n > 25nF$
coeficient de variație cu temperatura	$\alpha_c = 0 \div \pm 30ppm/°C$	variație maximă cu temperatura între $-50°C \div 125°C$: $\pm 20\% C_n$

Condensatoarele pot fi imersate în aliaj de lipit la 230°C±10°C, timp de 10 secunde.

6.1.3. CONDENSATOARE ELECTROLITICE CU ALUMINIU

Aceste condensatoare sînt realizate pentru $C_n = 0{,}1$ μF÷2,2 μF, toleranța −10%÷+50%, tensiunea nominală $U_n = 6{,}3 \div 63$ V și dimensiuni 8×3,6×3,7 mm sau 12×3,6×3,7 mm (fig. 6.4). Au aceeași structură ca și condensatoarele electrolitice cu electrolit lichid: folii de aluminiu asperizate bobinate împreună cu straturi de hîrtie impregnate în electrolit lichid; totul este închis în cutie de aluminiu și protejat într-o capsulă de plastic. Două zone metalizate, axiale permit conectarea condensatorului pe cablajul imprimat (PCI) [25].

6.1.4. CONDENSATOARE ELECTROLITICE CU TANTAL

Condensatoarele electrolitice cu tantal, specifice acestei tehnologii, au aceeași structură ca și condensatoarele cu tantal cu terminale. Ele se obțin pentru $C_n = 0{,}1$ μF÷100 μF, cu toleranța ±(5, 10, 20)% și $U_n = 4 \div 50$ V. Dimensiunile sînt cuprinse între limitele: 2,54×1,27×1,27 mm și 7,25×3,81×2,79 mm iar forma lor este paralelipipedică (fig. 6.5) [25].

Astfel de componente au fost asimilate la Tehnoton — Iași.

6.1.5. TERMISTOARE

Termistoarele folosite în tehnologia SMD au coeficient de temperatură negativ și sînt construite sub forma unor discuri de diametru ∅=2,9 mm, de înălțime $H = 0{,}7 \div 3$ mm, cu două zone metalizate de contact pe o față a discului. Sînt de valoare nominală de 2,2 kΩ, cu constanta $B = (3\,350 \div 4\,300)$ K.

Există și termistoare cu coeficient de temperatură pozitiv; de asemenea, și varistoare miniatură [25].

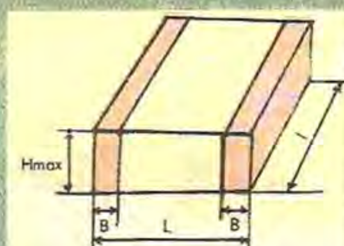


Fig. 6.3. Condensator ceramic multistrat: *L* — lungimea; *l* — lățimea; *H* — înălțimea; *B* — lățimea zonei metalizate.

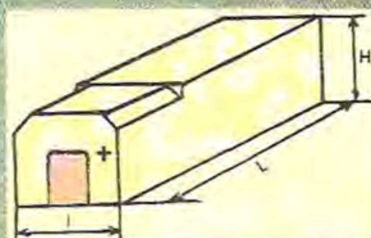


Fig. 6.4. Condensator electrolitic cu electrolit lichid: *L* — lungimea; *l* — lățimea; *H* — înălțimea.

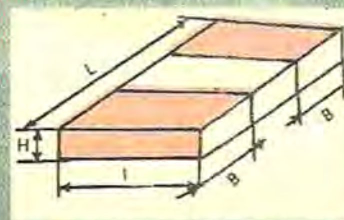


Fig. 6.5. Condensator electrolitic cu tantal: *L* — lungimea; *l* — lățimea; *H* — înălțimea; *B* — lățimea zonei metalizate.

6.1.6. REZISTOARE SEMIVARIABILE

Pentru această tehnologie s-au construit rezistoare semivariabile cermet, simple sau multitură, cu valoare nominală în gama 1 Ω÷500 kΩ, de toleranță ±10%, cu P_n=0,5 W (la 85°C) și de dimensiuni 5,1×5,1×3,8 mm sau 6,4×6,4×5,1 mm [25].

6.1.7. BOBINE

Valorile inductanței pentru bobinele construite în această tehnologie sînt cuprinse între 4 nH÷1 mH, cu toleranța ±10%. Dimensiunile pentru astfel de bobine (fig. 6.6) sînt cuprinse, în funcție de valoarea inductanței, între următoarele limite:

L=2,79÷4,064 mm
l=2,03÷2,794 mm
H=1,40÷2,54 mm
B±0,1=0,51÷0,762 mm

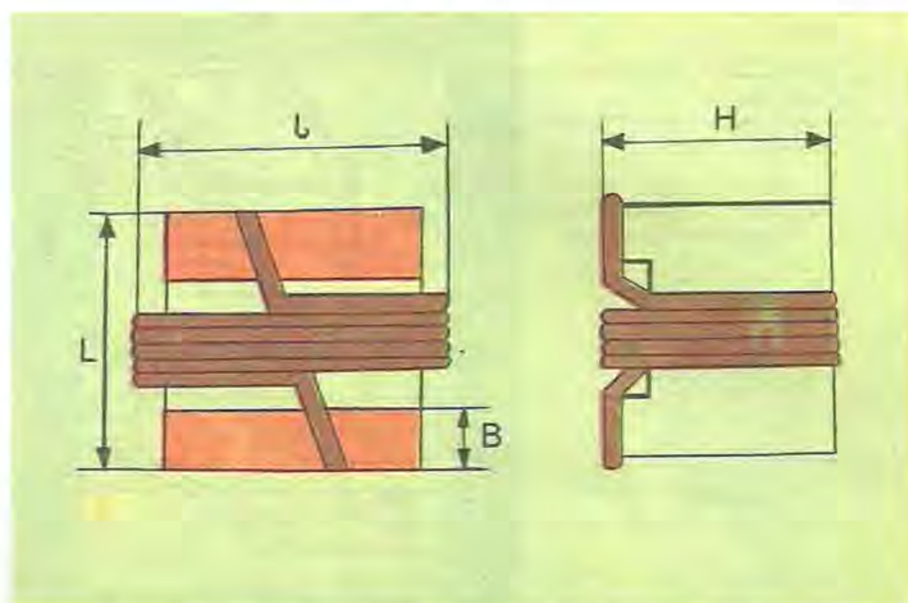


Fig. 6.6. Bobină: *L* — lungimea; *l* — lățimea; *B* — zona metalizată.

Pentru bobinele cu miez de ferită valoarea inductanței este cuprinsă între 1 mH÷470 mH, cu toleranța ±20% iar dimensiunile cipului sînt de 4,2×4,8×3,7 mH [25], [29].

Toate componentele specifice acestei tehnologii sînt livrate în benzi cu alveole, bobinate pe role, în magazii speciale sau în vrac, în funcție de echipamentul automat de poziționare aflat în dotare.

6.2. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND TEHNOLOGIA MONTĂRII PE SUPRAFAȚĂ A COMPONENTELOR

Realizarea cablajelor imprimate pentru SMA implică respectarea considerentelor generale de proiectare a PCI, dar și apariția unor reguli specifice acestei tehnologii, impuse de procesul tehnologic în sine.

Datorită minimizării dimensiunilor componentelor se folosește o rețea modulară de 1,27 mm, iar lățimea traseelor și distanța dintre ele poate fi micșorată pînă la 100 μm, prevăzîndu-se însă prin proiectare modalități de verificare, reparare și întreținere a subansamblului considerat.

Procedeele de realizare a lipirii componentelor pe suport utilizate frecvent sînt *lipirea prin retopire* și *lipirea în val*; ele determină la rîndul lor reguli proprii de proiectare a traseelor de cablaj imprimat, impunînd mărimea suprafeței de conectare și dispunerea componentelor.

Fluxul tehnologic al unei PCI realizată prin lipire „prin retopire" cuprinde:

— realizarea traseelor de cablaj imprimat;
— depunerea aliajului de lipit pe toată suprafaţa PCI;
— plasarea automată a componentelor de către maşini automate de poziţionat;
— încălzirea PCI cu componentele poziţionate, la temperatura necesară realizării simultane a tuturor lipiturilor, încălzire care se face cu plită caldă, cu radiaţii infraroşii sau prin şoc termic (produs de condensarea unor compuşi fluoruraţi, cu temperatura de fierbere de aproximativ 200°C).

Acest procedeu foloseşte numai componente SMD plasate pe o singură faţă a cablajului imprimat, obţinîndu-se o densitate maximă de componente.

Lipirea „în val" este folosită atunci cînd se utilizează componente SMD alături de componente cu terminale; fluxul tehnologic de obţinere a unei PCI echipate prin această metodă implică:
— proiectarea corespunzătoare a cablajului imprimat, ţinînd cont de faptul că pentru componentele cu terminale trebuie prevăzute găuri, iar componentele SMD (fiind concepute să suporte şocul termic la trecere prin baia de aliaj de lipit) se vor plasa pe partea placată;
— realizarea PCI astfel proiectată;
— depunerea adezivului pentru fixarea componentelor SMD, poziţionarea componentelor şi uscarea adezivului cu radiaţii ultraviolete sau infraroşii (pentru a asigura fixarea componentei pe zona de contactare respectivă);
— plantarea componentelor cu terminale;
— lipirea în instalaţie de lipire în val, cu componentele SMD trecînd prin valul de aliaj de lipit.

Lipirea în val implică, faţă de lipirea prin retopire, suprafeţe mai mari de contactare a componentelor şi o orientare a acestora în lungul undei de aliaj de lipit pentru a evita rotirea componentelor înalte sau blocarea undei, precum şi apariţia unor fenomene de „umbră" (scurtcircuit între două componente), sau de „punte" (scurtcircuit între mai multe componente).

Tehnologia montării pe suprafaţă a componentelor oferă, prin urmare, cîteva certe avantaje:
— miniaturizarea componentelor şi proiectarea corespunzătoare a traseelor de cablaj imprimat determină reducerea drastică a dimensiunilor PCI;
— datorită procesului de producţie complet automatizat numărul defectelor rezultate în timpul procesului de producţie este foarte mic (numărul de defecte poate scădea cu pînă la 99%), comparativ cu plantarea automată a componentelor cu terminale;
— această tehnologie asigură o calitate superioară produselor finite, o comportare mai bună a circuitelor în înaltă frecvenţă (elementele parazite practic dispar), rezistenţă mai mare la solicitări mecanice, deci o fiabilitate ridicată;
— costul unui circuit electronic realizat prin această tehnologie se reduce cu pînă la 50% datorită vitezei mari de asamblare, reducerii consumului de materiale, folosirii cablajelor fără găuri sau cu număr mic de găuri.

Dezavantajele de moment ale acestei tehnologii constau în:
— necesitatea reproiectării cablajelor;
— obţinerea tuturor tipurilor de componente în formă SMD;
— procurarea echipamentelor automate de montare;
— efort financiar inerent asimilării unei tehnologii noi.

BIBLIOGRAFIE

1. Apostol, P. — *Rezistoare, condensatoare, bobine*. Ed. Tehnică, Buc. 1969
2. Bacivarof, I. — *Conexiuni prin lipire în aparatura electronică*. Ed. Tehnică, Buc. 1984
3. Bortnowski, G. A. — *Circuite imprimate în construcțiile radioamatorilor*. Ed. Tehnică, Buc. 1974
4. Cătuneanu, V. (coordonator) — *Materiale pentru electronică*. E.D.P. Buc. 1982
5. Cătuneanu, V., Svasta, P. (coordonatori), Moraru, D. ș.a. — *Tehnologie electronică*. E.D.P., Buc. 1984
6. Cătuneanu, V. (coordonator), Moraru, D. ș.a. — *Tehnologie electronică — componente pasive (îndrumar de laborator)*. I.P.B., Buc. 1984
7. Codreanu, C., Coloși, T., — *Termistoare și varistoare în măsurări și automatizări*. Ed. Tehnică, Buc. 1970
8. Drăgulănescu, N. — *Agenda radioelectronistului*. Ed. Tehnică, Buc. 1984; 1989
9. Săvescu, M. (coordonator) — *Tehnologia de fabricație a pieselor radioelectronice*. Ed. Tehnică, Buc. 1968
10. Lozneanu, S., Árpad Laczko — *Memoratorul radiotehnicianului*; Ed. Junimea, Iași 1985
11. Millea, A. — *Bobine radio*. Ed. Tehnică, Buc. 1962
12. Nicolau, Ed. (coordonator) — *Manualul inginerului electronist. Radiotehnică* (vol. I). Ed. Tehnică, Buc. 1987
13. Radu, Ov. — *Componente electronice pasive*. Ed. Tehnică, Buc. 1981
14. Ristea, I. ș.a. — *Manualul muncitorului electronist*. Ed. Tehnică, Buc. 1980
15. Smirenin, B. A. — *Manual de radiotehnică*. Ed. Energetică de Stat, Buc. 1954
16. *** — *Radiorecepția A—Z*. Ed. Albatros, Buc. 1982
17. *** — *Practica electronistului amator*. Ed. Albatros, Buc. 1984
18. *** — *Montaje electronice de vacanță*. Ed. Albatros, Buc. 1988
19. *** — *Rezistoare (catalog)*. I.P.E.E. — Curtea de Argeș, 1986
20. *** — *Condensatoare (catalog)*. I.P.E.E. — Curtea de Argeș, 1986
21. *** — *Potențiometre (catalog)*. I.P.E.E. — Curtea de Argeș, 1986
22. Croitoru, V.; Miroiu, C.; Sofron, E. ș. a. — *Electronica — îndrumar pentru lucrări practice*. Institutul Politehnic — București, 1987
23. Miroiu, C.; Olaru, V. — *Lucrări practice de componente și circuite electronice*. E.D.P., Buc. 1983
24. Miroiu, C. (coordonator) — *Seturi de diapozitive color: Rezistoare; Condensatoare; Bobine, circuite selective de cuplaj, filtre; Cablaje imprimate*.
25. *Besson, René — Technologie des composants électroniques Tome 3*. Editions Radio, Paris, 1986
26. I.C.S.I.T.E. — *Tehnologii de montaj a modulelor electronice analogice și digitale fără implantare. Montaj plan*. S.T., 1986
27. *Colecție Electronic Production*, 1985—1989
28. Svasta, P. (coordonator) — *Tehnologia subansamblelor electronice; interconectarea componentelor — îndrumar de laborator*. I.P.B., 1989
29. Svasta, P. (coordonator), Moraru, D. ș. a. — *Tehnologie electronică; componentă electronice pasive — îndrumar de laborator*. I.P.B., 1989